



Ana Filipa Rodrigues Gameiro

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**Produção de Misturas Betuminosas
com Betumes Modificados:
Compactabilidade e Comportamento
Mecânico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil - Perfil de Construção

Orientador: Rui Micaelo, Professor Auxiliar FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Teresa Santana

Arguente: Prof. Luís Quaresma

Vogais: Prof. Doutor Rui Micaelo



Setembro 2013

Copyright©2011 Ana Filipa Rodrigues Gameiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicado aos meus pais e irmãos

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem a intervenção directa ou indirecta de algumas pessoas e instituições, motivo pelo qual gostaria de apresentar o meu agradecimento.

Começo por agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, instituição que me formou e me acolheu durante todos estes anos.

Ao meu orientador Rui Micaelo, por toda a informação, conhecimento transmitido, apoio e disponibilidade constante.

À empresa Probigalp – Ligantes Betuminosos S.A. e ao laboratório NIDIn, por todo o material e equipamentos disponibilizados. À Eng.^a Cátia Duarte, orientadora da componente laboratorial, por me ter permitido realizar este estudo. Ao Sr. Augusto e à Inês Marques por toda a documentação disponibilizada, esclarecimento de dúvidas e disponibilidade apresentada. Ao Ulisses por todo o apoio nos ensaios realizados, disponibilidade e boa disposição, sem a sua ajuda todo o trabalho laboratorial seria mais árduo. A todo o pessoal da manutenção pelos serviços prestados e que de alguma forma permitiram que o equipamento estivesse sempre apto a ser utilizado.

Agradeço ao Instituto Superior Técnico o acesso ao laboratório de Vias de Comunicação e Transporte e a utilização do equipamento necessário à realização dos ensaios em falta para o término da tese. Um especial agradecimento ao técnico Rui Garcia pela disponibilidade e auxílio nos ensaios realizados.

Um agradecimento às empresas Eurocálcio, Betnor e Alves Ribeiro por terem facultado todos os agregados necessários, sem este material o trabalho não seria exequível.

Ao Eng.^o Arthur Mendes, Eng.^a. Ana Maria Nunes e à Eng.^a Isabel das Estradas de Portugal por toda a disponibilidade, atenção, preocupação para com trabalho realizado e soluções apresentadas.

A todos os meus amigos, especialmente à Estela José, Mariana Bernardino, Diana Santos e Edna Silva por toda a paciência, apoio e motivação. Obrigada pelos momentos que me proporcionaram fora do trabalho que me incentivaram a voltar a cada semana. Ao meu amigo Hugo por todos os contactos disponibilizados e apoio.

Obrigada ao meu amigo Mário João Fartaria, a sua ajuda, apoio e paciência foram sem duvida cruciais para o término deste trabalho. Agradeço a companhia no momento em que este trabalho parecia inexecuível, obrigada por acreditares e me fazeres acreditar que era possível.

Para finalizar um enorme e sincero agradecimento aos meus pais, Timóteo Gameiro e Natália Rodrigues, sem eles todo este caminho não seria possível. Obrigada pelo apoio e incentivo essencial nos momentos mais difíceis. Aos meus irmãos Carla Gameiro e Pedro Gameiro, pela paciência e apoio.

Resumo

Em virtude das condições mais severas de tráfego e das restrições orçamentais e temporais na manutenção da rede rodoviária, a aplicação de misturas betuminosas incorporando betumes modificados com polímero (PMB) tem aumentado significativamente. Contudo, não existe uma metodologia definida para a determinação das temperaturas de mistura e compactação envolvidas no processo de produção deste tipo de misturas.

Neste trabalho, descreve-se um estudo experimental com o objectivo de avaliar a influência das temperaturas de produção no comportamento de uma mistura com PMB, durante o processo de fabrico e em serviço. O betão betuminoso rugoso AC 14 *surf* PMB 45/80-65 foi fabricado e compactado às temperaturas propostas pelo produtor e determinadas segundo duas metodologias alternativas (Superpave e HSRV-E). O comportamento durante o fabrico é avaliado através do ensaio de compactabilidade de acordo com a EN 12697-10. A avaliação em serviço é realizada pelos ensaios de sensibilidade à água (EN 12697-12), módulo de rigidez (EN 12697-26), resistência à fadiga (EN 12697-24) e deformação permanente (EN 12697-22).

De acordo com os resultados obtidos, as três misturas estudadas mostraram resultados semelhantes de deformação permanente e sensibilidade à água. A resistência à compactação das misturas betuminosas e a sua resistência à fadiga foram os parâmetros mais afectados pela variação das temperaturas de produção.

PALAVRAS CHAVE:

Betume Modificado com Polímero

Temperatura de Fabrico

Temperatura de Compactação

Compactabilidade

Caracterização Mecânica

Abstract

The use of asphalts with polymer modified bitumens (PMB) in road pavements became common during the last two decades due to the improved performance of these mixtures in severe traffic conditions. However, up to now there is not an accepted methodology for the determination of the temperatures used in the mixing and compaction phases of the production process.

In this thesis is described an experimental study with the objective of evaluating the influence of the production temperatures on the compactability and the in-service performance of asphalts with PMBs. An AC 14 surf PMB 45/80-65 was fabricated and compacted in lab at the temperatures proposed by binder producers and determined with two different methodologies proposed in literature (Superpave and HSRV-E). The compactability was measured with the impact compactor accordingly to EN 12697-10. For the in-service performance assessment it was measured the water sensibility (EN 12697-12), the stiffness modulus (EN 12697-26), the fatigue resistance (EN 12697-24) and the rutting resistance (EN 12697-22).

Accordingly with the results obtained, the three mixtures showed similar rutting resistance and water sensibility values. The compatibility of the mix asphalt and its resistance to the fatigue are the parameters more affected by the variation of the production of temperatures.

KEY WORDS:

Polymer Modified Bitumen

Mix Temperature

Compaction Temperature

Compatibility

Mechanical Characterization

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento Temático	1
1.2.	Objectivos	2
1.3.	Conteúdo da Dissertação	2
2.	Estado do Conhecimento: Compactabilidade e Características Mecânicas.....	3
2.1.	Materiais Constituintes das Misturas Betuminosas.....	3
2.1.1.	Ligante Betuminoso	3
2.1.2.	Agregados	5
2.2.	Produção de Misturas Betuminosas.....	7
2.2.1.	Fabrico.....	7
2.2.2.	Compactação.....	10
2.3.	Características das Misturas Betuminosas	18
3.	Metodologia Experimental	21
3.1.	Introdução.....	21
3.2.	Caracterização dos Materiais Constituintes	23
3.2.1.	Caracterização do Ligante Betuminoso	23
3.2.2.	Caracterização dos Agregados	25
3.3.	Produção de Misturas Betuminosas.....	30
3.3.1.	Fabrico.....	30
3.3.2.	Compactação.....	40
3.4.	Caracterização do Desempenho das Misturas Betuminosas	43
3.4.1.	Ensaio de Sensibilidade à Água.....	43
3.4.2.	Ensaio de Resistência à Deformação Permanente.....	44
3.4.3.	Ensaio de Resistência à Fadiga e Rigidez	47
4.	Apresentação e Discussão de Resultados.....	53
4.1.	Caracterização dos Materiais Constituintes	53
4.1.1.	Caracterização do Ligante Betuminoso	53
4.1.2.	Caracterização dos Agregados	54
4.2.	Produção das Misturas Betuminosas.....	56
4.2.1.	Fabrico.....	56
4.2.2.	Compactação.....	62
4.3.	Caracterização do Desempenho das Misturas Betuminosas	65
4.3.1.	Sensibilidade à Água.....	65
4.3.2.	Resistência à Deformação Permanente.....	67

4.3.3. Resistência à Fadiga e Rigidez	69
5. Considerações finais	75
5.1. Conclusões	75
5.2. Desenvolvimentos Futuros	76
Referências Bibliográficas	77
Referências normativas.....	81
Anexos.....	83
<i>Anexo A - Relatório de Ensaio do Betume Modificado</i>	<i>83</i>
<i>Anexo B – Características Granulométricas dos Agregados</i>	<i>85</i>
<i>Anexo C – Fichas Técnicas dos Agregados</i>	<i>86</i>
<i>Anexo D - Temperaturas de mistura e compactação aconselhadas pelos produtores</i>	<i>90</i>
<i>Anexo E – Valores obtidos para efeito de cálculo das temperaturas de produção da mistura betuminosa</i>	<i>91</i>
<i>Anexo F – Valores considerados para o método Superpave e HSRV-E.....</i>	<i>93</i>
<i>Anexo G – Estudo de formulação da mistura betuminosa.....</i>	<i>94</i>
<i>Anexo H – Fuso Granulométrico e Curva da Mistura Betuminosa Final</i>	<i>97</i>
<i>Anexo I – Resultados dos Ensaio de Compactabilidade</i>	<i>98</i>
<i>Anexo J – Resultados do Ensaio de Pista</i>	<i>99</i>
<i>Anexo K – Resultado do Ensaio do Modulo de Rigidez.....</i>	<i>102</i>
<i>Anexo L – Resultados do Ensaio de Resistência à Fadiga</i>	<i>103</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação da constituição de uma mistura betuminosa compactada – Picado Santos, 2008	3
Figura 2.2 - Comportamento reológico de uma mistura betuminosa face à variação de temperatura e tempo de carregamento - Adaptado Pereira, 2009	3
Figura 2.3 – Comportamento reológico dos materiais Newtonianos - Modificado de Yildirim et al., 2000	4
Figura 2.4 - Comportamento reológico dos materiais “shear-thinning” - Modificado de Yildirim et al., 2000	4
Figura 2.5 – Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas betuminosas – Effting, 2013	6
Figura 2.6 – Classificação das misturas betuminosas em função das temperaturas de mistura – EAPA, 2010	7
Figura 2.7 – Efeito da porosidade no módulo de rigidez dinâmica - Shell, 1990	11
Figura 2.8 – Compactador de impacto Marshall (Laboratório NIDIn)	12
Figura 2.9 – Cilindro metálico de rasto liso (Laboratório NIDIn)	13
Figura 2.10 – Representação do factor C – Huerne, 2004	15
Figura 2.11 - Resistência à compactação relativamente à % de retidos no peneiro 2mm – Jonsson, 2000	16
Figura 2.12 - Resistência à compactação C em relação à quantidade de filler na mistura betuminosa – Jonsson, 2000	17
Figura 3.1 - Esquema do processo de estudo da mistura betuminosa	22
Figura 3.2 - Sistema piloto de modificação do betume puro (Laboratório NIDIn)	23
Figura 3.3 – Viscosímetro Rotacional Brookfield DV-II+Pro (Laboratório NIDIn)	24
Figura 3.4 – Conjunto de peneiros da marcação CE sujeitos a agitação mecânica (Laboratório NIDIn)	25
Figura 3.5 – Picnómetro com água e amostra após remoção do ar do seu interior (Laboratório NIDIn)	26
Figura 3.6 – Registo da temperatura da água no interior do picnómetro (Laboratório NIDIn)	26
Figura 3.7 – Apiloamento do provete no interior do molde troncocónico (Laboratório NIDIn)	27
Figura 3.8 – Forma do provete após desmoldagem (Laboratório NIDIn)	27
Figura 3.9 – Absorção das partículas visíveis d água no provete (Laboratório NIDIn)	28
Figura 3.10 – Cesto de rede metálica utilizado para o cálculo de massas volúmicas e absorção de água pelo método C (Laboratório NIDIn)	29
Figura 3.11 – Tanque com água utilizado para cálculo de massas volúmicas e absorção de água pelo método C (Laboratório NIDIn)	29
Figura 3.12 – Esquema representativo da selecção da haste consoante as condições de ensaio	30
Figura 3.13 – Representação gráfica das viscosidades a taxa de corte zero (η_0) e infinita (η_∞) - Barnes, 2000	31

Figura 3.14 – Gráfico representativo da determinação das temperaturas de produção - Yildirim et al., 2000.....	31
Figura 3.15 – Esquema das etapas constituintes do método de Marshall	33
Figura 3.16 – Misturador utilizado para a produção da mistura betuminosa (Laboratório NIDIn)	33
Figura 3.17 - Massa para ensaio da baridade máxima teórica (Laboratório NIDIn)	34
Figura 3.18 – a) Saída do ar da mistura betuminosa por auxílio de sistema de vácuo e vibração, b) Pormenor da saída do ar do interior do picnómetro (Laboratório NIDIn).....	34
Figura 3.19 – Provetes selado (Laboratório NIDIn)	36
Figura 3.20 – Proвете submetido ao ensaio de Marshall (Laboratório NIDIn)	37
Figura 3.21 – Gráficos dos valores obtidos para cada percentagem de betume, relativos às variáveis estudadas no método de Marshall - Adaptado de Gardete et al., 2009	38
Figura 3.22 – a) Mufla utilizada no ensaio de ignição do betume; b) Amostra da mistura no interior do cesto de teste anteriormente ao ensaio; c) Amostra da mistura posteriormente ao ensaio (Laboratório NIDIn)	39
Figura 3.23 - Molde metálico para compactação de provetes cilíndricos (Laboratório NIDIn)	40
Figura 3.24 – a) Fixação do molde e rampa para cilindro de rolos; b) Preparação do molde metálico para introdução da mistura betuminosa (Laboratório NIDIn)	41
Figura 3.25 – a) Mistura no interior do molde pronta para processo de compactação; b) Preparação do cilindro de rolos para o processo de compactação	41
Figura 3.26 - Mistura após processo de compactação (Laboratório NIDIn)	41
Figura 3.27 – a) Provetes compactados a diferentes energias de compactação; b) Provetes disposto verticalmente por incremento de energia de compactação (Laboratório NIDIn)	42
Figura 3.28 – Aplicação de vácuo sobre o conjunto de provetes húmidos (Laboratório NIDIn).....	43
Figura 3.29 – a) Provetes submetidos a tracção indirecta; b) Provetes com rotura combinada (Laboratório NIDIn).....	44
Figura 3.30 – a) Equipamento para ensaio de pista, modelo <i>small size device</i> ; b) Interior do equipamento para ensaio de pista, modelo <i>small size device</i> (Laboratório NIDIn)	44
Figura 3.31 – a) Provetes desmoldados e serrados; b) Equipamento de serragem (Laboratório NIDIn)	45
Figura 3.32 – a) Fixação do provete ao suporte; b) Conjunto fixo no equipamento de ensaio (Laboratório NIDIn).....	46
Figura 3.33 – a)Provetes após realização do ensaio; b) Pormenor da rodeira (Laboratório NIDIn)	46
Figura 3.34 – Equipamento de flexão em 4 pontos com sistema hidráulico no interior da câmara climática (Laboratório NIDIn).....	47
Figura 3.35 – Pormenor do equipamento de flexão em 4 pontos(Laboratório NIDIn)	47
Figura 3.36 - Equipamento de flexão em 4 pontos com sistema de ar comprimido (Laboratório do IST)	47
Figura 3.37 – Sistema de ar comprimido utilizado no ensaio de flexão em 4 pontos (Laboratório IST)	47
Figura 3.38 – Representação esquemática dos tipos de carregamento - Pinto, 1991	48
Figura 3.39 - Esquema da realização de ensaios de flexão em 4 pontos - Pais & Palha, 2010.	48

Figura 3.40 – a) Laje para ensaio de resistência à fadiga; b) Provete após serragem (Laboratório NIDIn)	49
Figura 3.41 – Definição do módulo de rigidez inicial - Jacobs & Sluer, 2009	50
Figura 3.42 - Resultados dos ensaios de fadiga expressos em termos de lei de fadiga - Pais & Palha, 2010.....	51
Figura 4.1 – Representação gráfica da viscosidade em função da taxa de corte para uma temperatura de 135°C	54
Figura 4.2 – Identificação dos agregados: filer comercial e pó de pedra	54
Figura 4.3 - Identificação dos agregados brita 8/12,5 e 10/16.....	55
Figura 4.4 – Granulometrias dos agregados utilizados na formulação da mistura betuminosa	55
Figura 4.5 – Cálculo das temperaturas de mistura e compactação pelo método Superpave	57
Figura 4.6 – Cálculo das temperaturas de mistura e compactação pelo método HSRV-E	57
Figura 4.7 – Curva granulométrica da mistura AC 14 <i>surf</i> (BBr) e fuso adoptado	59
Figura 4.8 – Representação gráfica baridade máxima teórica	60
Figura 4.9 – Representação gráfica baridade dos provetes compactados.....	60
Figura 4.10 - Representação gráfica da porosidade	60
Figura 4.11 – Representação gráfica do VMA	60
Figura 4.12 – Representação gráfica da estabilidade de Marshall	60
Figura 4.13 – Representação gráfica da deformação Marshall	60
Figura 4.14 – Variação da baridade dos provetes compactados com o aumento da energia de compactação	62
Figura 4.15 – Diminuição da porosidade dos provetes com o aumento da energia de compactação .	62
Figura 4.16 – Provetes dispostos verticalmente por aumento de energia de aplicação (Laboratório NIDIn)	63
Figura 4.17 – Provetes com 5 pancadas (esquerda) dispostos lateralmente aos provetes 100 pancadas (direita), (Laboratório NIDIn).....	64
Figura 4.18 – Valores obtidos para ITSd e ITSw para os provetes preparadas a diferentes temperaturas	66
Figura 4.19 – Representação gráfica do desenvolvimento da rodeira (mm)	68
Figura 4.20 – Evolução da deformação permanente e misturas betuminosas – Gardete, 2006.....	68
Figura 4.21 – Representação gráfica do módulo de rigidez para as misturas betuminosas em estudo	71
Figura 4.22 – Representação do ângulo de fase para as misturas betuminosas em estudo.....	71
Figura 4.23 – Representação do módulo de rigidez para as misturas betuminosas em estudo ignorando os resultados para as frequências 0,2Hz e 50Hz	72
Figura 4.24 - Representação do ângulo de fase para as misturas betuminosas em estudo ignorando os resultados para as frequências 0,2Hz e 50Hz	72
Figura 4.25 – Relação entre modulo de rigidez e o ângulo de fase para as misturas betuminosas em estudo ignorando os resultados para as frequências 0,2Hz e 50Hz	72
Figura 4.26 – Vida à fadiga associada a cada uma das misturas em estudo.....	74

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (Azevedo, 1987 citado em Batista, 2004)	6
Quadro 2.2 - Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (AIPCR, 1990 citado em Batista, 2004)	6
Quadro 2.3 – Influência dos parâmetros sobre a compactabilidade de misturas betuminosas (Micaelo, 2008).....	17
Quadro 4.1 – Resultados /Requisitos do betume PMB 45/80-65	53
Quadro 4.2 – Identificação dos Agregados	54
Quadro 4.3 – Massas volúmicas dos agregados	55
Quadro 4.4 – Designação da mistura betuminosa consoante as temperaturas de mistura e compactação	58
Quadro 4.5 – Percentagem de cada agregado a incorporar na mistura betuminosa	59
Quadro 4.6 – Características dos provetes realizados para efeito de ensaio de Marshall.....	59
Quadro 4.7 – Parâmetros obtidos para a percentagem óptima da mistura betuminosa	61
Quadro 4.8 – Valores de resistência à compactação (C)	62
Quadro 4.9 - Características dos provetes sujeitos ao ensaio ITSr	65
Quadro 4.10 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água.....	66
Quadro 4.11 – Características volumétricas médias dos provetes.....	67
Quadro 4.12 – Resultados médios dos 2 provetes do Ensaio de Pista	68
Quadro 4.13 – Características volumétricas das vigas para ensaio de resistência à fadiga e modulo de rigidez	69
Quadro 4.14 - Características volumétricas das vigas para ensaio de resistência à fadiga e modulo de rigidez (Continuação)	70
Quadro 4.15 – Valores do modulo de rigidez e ângulo de fase para as misturas em estudo obtidos para uma frequência de 10Hz	73
Quadro 4.16 – Coeficientes das leis de fadiga das misturas betuminosas	74

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolos:

Letras Romanas

C – Resistência à compactação

D_{\max} – Máxima dimensão do agregado

F – Deformação Marshall

S - Estabilidade Marshall

V_m – Porosidade

V_v – Volume de vazios

Letras Gregas

η_0 – Viscosidade a taxa de corte zero

η_∞ - Viscosidade a taxa de corte infinita

ρ_{mv} - Baridade máxima teórica

ρ_b - Baridade dos provetes compactados

Siglas:

AC – *Asphalt Concrete* (Betão Betuminoso)

AIPCR – Associação Internacional Permanente dos Congressos de Estradas

EAPA – *European Asphalt Pavement Association* (Associação Europeia Pavimentos Betuminosos)

EU – União Europeia

EN – Norma Europeia

FHWA - *Federal Highway Administration's* (Administração Federal Rodoviária)

HMA – *Hot Mix Asphalt* (Mistura Betuminosa a Quente)

HSRV - *High Shear Rate Viscosity* (Viscosidade a Taxa de Corte Elevada)

HSRV-E – *High Shear Rate Viscosity - Evolution* (Viscosidade a Taxa de Corte Elevada- Evolução)

IST – Instituto Superior Técnico

ITS_w – *Indirect Tensile Strength of the Wet Group* (Resistência à Tracção Indirecta do Grupo Húmido)

ITS_d - *Indirect Tensile Strength of the Dry Group* (Resistência à Tracção Indirecta do Grupo Seco)

ITSR - *Indirect Tensile Strength Ratio* (Resistência à Tracção Indirecta)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MatLab – *Matrix Laboratory* (software)

NIDIn – Núcleo Investigação Desenvolvimento e Inovação

PRN 85 - Plano Rodoviário Nacional de 1985

PMB – *Polymer Modified Bitumen* (Betume Modificado com polímero)

PRD_{air} – *Mean Proportional Rut Depth in air* (Percentagem da Profundidade Média de Rodeira)

rpm – Rotações por minuto

RD_{air} – *Mean rut depth in air* (Profundidade de Rodeira)

SBS – *Styrene- Butadiene-Styrene* (Estireno-Butadieno-Estireno)

Superpave – *SUperior PERforming asphalt PAVEments*

SR – *Shear Rate* (Taxa de Corte)

SS – *Shear Stress* (Tensão de Corte)

VFB - *Void Filled with Binder* (Vazios na Mistura de Agregado Preenchidos com Betume)

VMA - *Voids in Mineral Aggregates* (Vazios na Mistura de Agregado)

WMA – *Warm Mix Asphalt* (Misturas Betuminosas Temperadas)

WTS_{air} - *Wheel Tracking Slope* (Taxa de Deformação no Ensaio de Pista ao Ar)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Temático

A utilização do ligante betuminoso na pavimentação de estradas revolucionou o sector dos meios de transporte e das vias de comunicação, nos primórdios do século XIX. Desde então, este é o material predominantemente utilizado na construção de estradas e manutenção da Rede Rodoviária a nível mundial. Em Portugal, particularmente, verificou-se um grande investimento nas estruturas rodoviárias desde a implementação do Plano Rodoviário Nacional de 1985 (PRN 85) aquando a entrada do nosso país para a União Europeia (UE) (Picado Santos et al., 2011).

Desde então, tem-se verificado um aumento das exigências estruturais e funcionais dos pavimentos devido ao aumento do número de veículos pesados e das cargas transportadas por estes. De forma a responder às novas exigências, tem vindo a ser estudada a melhoria das características mecânicas das misturas betuminosas, pela adição de polímero ao betume convencional (Silva, 2000 citado em Cardoso, 2002). No entanto a selecção adequada das temperaturas para manusear os betumes modificados tem sido um problema, pois não existe actualmente um método definido para o seu cálculo.

Segundo West et al. (2010), 56% de 65 agências sediadas nos Estados Unidos, Canadá, Austrália, China, Dinamarca, Índia, Japão e Malásia, utilizam as temperaturas recomendadas pelos produtores no fabrico e compactação de misturas betuminosas modificadas com polímero.

No entanto, as temperaturas recomendadas pelos produtores derivam da experiência ou dos métodos tradicionais aplicados em betumes puros. Estes métodos quando aplicados a betumes modificados originam frequentemente temperaturas irrealisticamente altas que podem causar preocupações estruturais e funcionais (degradação das propriedades do ligante), ambientais (emissões de gases poluentes em laboratório e em trabalho de campo) e socioeconómicas (custos energéticos).

As temperaturas envolvidas nos processos de mistura e compactação de uma mistura betuminosa afectam de forma considerável as características mecânicas do pavimento, que por sua vez, vão ditar o seu desempenho a nível estrutural e funcional ao longo da sua vida útil. Tal facto deve-se ao betume ser um material muito sensível à temperatura, cujo comportamento pode variar de sólido a fluido, sendo a viscosidade a variável caracterizadora do seu comportamento reológico a temperaturas mais elevadas.

É então pertinente avaliar os efeitos da variação das temperaturas de produção no comportamento das misturas betuminosas, durante a produção e ao longo da sua vida útil.

1.2. Objectivos

Este trabalho pretende dar continuidade a dois estudos realizados anteriormente. No primeiro estudo foram comparadas as temperaturas de fabrico e compactação de betumes puros e modificados obtidas segundo várias metodologias com as recomendadas pelo fabricante (Santos, 2011). No segundo estudo foi avaliado o efeito da adição de agregado fino (fíler) em betumes puros e modificados, no comportamento reológico a temperaturas elevadas (Matos, 2012).

O objectivo do presente trabalho é avaliar o efeito da variação das temperaturas de fabrico e compactação no comportamento de uma misturas betuminosa rugosa, durante a sua produção (fabrico e pavimentação) e em serviço (comportamento mecânico). Para uma mistura seleccionada previamente, AC 14 surf PMB 45/80-65¹, o comportamento durante a produção foi avaliado a partir da compactabilidade e em serviço através das propriedades de sensibilidade à água, módulo de rigidez, resistência à fadiga e à deformação permanente.

1.3. Conteúdo da Dissertação

Este trabalho é constituído por cinco capítulos. No presente capítulo, faz-se o enquadramento temático deste trabalho, no qual se expõem algumas considerações gerais sobre o aparecimento das misturas betuminosas com betumes modificados e da problemática inerente às temperaturas adequadas para a sua produção.

No capítulo dois faz-se um resumo bibliográfico sobre as misturas betuminosas. Inicia-se com uma breve referência aos principais componentes e a importância destes na constituição das misturas betuminosas. Segue-se uma breve descrição sobre a produção das mesmas, nomeadamente, processos de fabrico e compactação, com ênfase nas temperaturas envolvidas em ambos os processos. Por último apresentam-se as características pretendidas para o eficiente desempenho das misturas betuminosas.

O terceiro capítulo aborda a metodologia experimental. Nele é incluída a caracterização dos componentes da mistura (betume e agregados), apresentam-se os métodos de formulação e compactação e descrevem-se os ensaios realizados para o estudo do comportamento mecânico e desempenho da mesma.

No capítulo quatro, apresentam-se os resultados experimentais obtidos e procede-se à sua análise e discussão.

No capítulo cinco, sintetizam-se as principais conclusões alcançadas com a realização deste trabalho. Para finalizar propõem-se alguns estudos que poderão ser desenvolvidos no futuro de forma a complementar o trabalho presente.

¹ Designação da mistura de acordo com a norma NP EN 13108-1:2008

2. ESTADO DO CONHECIMENTO: COMPACTABILIDADE E CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

2.1. Materiais Constituintes das Misturas Betuminosas

As misturas betuminosas são constituídas maioritariamente por material mineral (cerca de 90%), sendo a restante percentagem atribuída ao ligante betuminoso e a vazios preenchidos com ar (Figura 2.1).

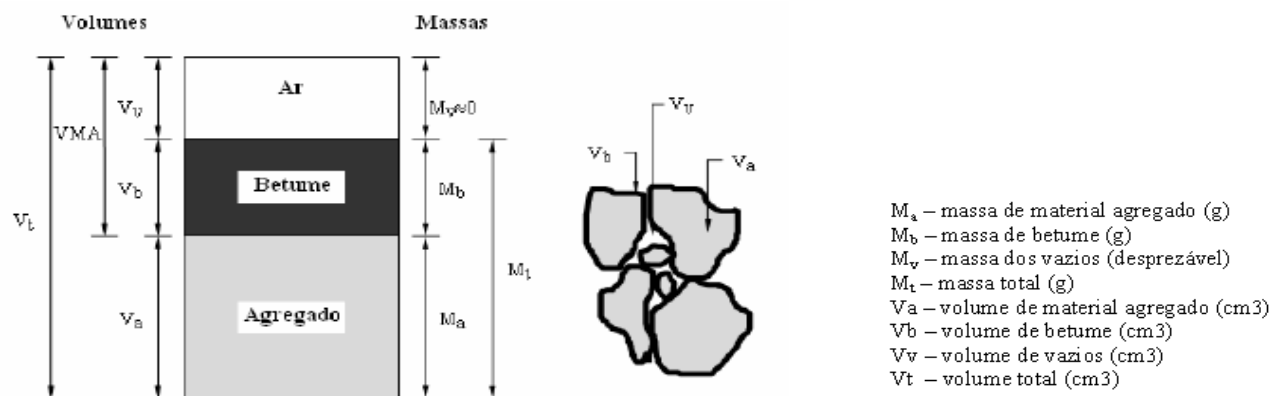


Figura 2.1 – Representação da constituição de uma mistura betuminosa compactada – Picado Santos, 2008

2.1.1. Ligante Betuminoso

O ligante betuminoso permite a ligação entre os agregados, garante flexibilidade à mistura betuminosa, assegura impermeabilidade, durabilidade e confere-lhe trabalhabilidade (Silva, 2005). Para além das funções apresentadas anteriormente, o ligante tem influência directa no comportamento mecânico da mistura betuminosa, ou seja, determina o seu comportamento viscoelástico em serviço. Assim, a mistura apresenta características que podem variar dos extremos viscoso a elástico consoante a temperatura e as condições de carregamento a que está sujeito (Figura 2.2).

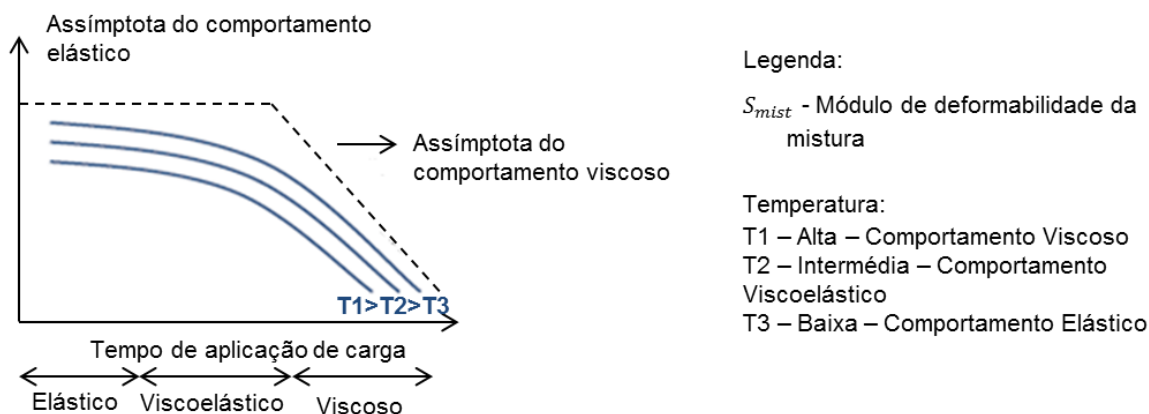


Figura 2.2 - Comportamento reológico de uma mistura betuminosa face à variação de temperatura e tempo de carregamento - Adaptado Pereira, 2009

A avaliação do desempenho do ligante é realizada através de ensaios tais como os de penetração, ductilidade, ponto de amolecimento, medição do ponto de inflamação, viscosidade e determinação da recuperação elástica (EN 14023, 2005).

A forma como a viscosidade varia com a taxa de corte, a uma determinada temperatura, define o tipo de comportamento reológico do betume. Os betumes puros têm um comportamento reológico conhecido como Newtoniano (Figura 2.3), enquanto os betumes modificados apresentam um comportamento não-Newtoniano do tipo “*shear-thinning*” ou pseudoplástico (Figura 2.4).

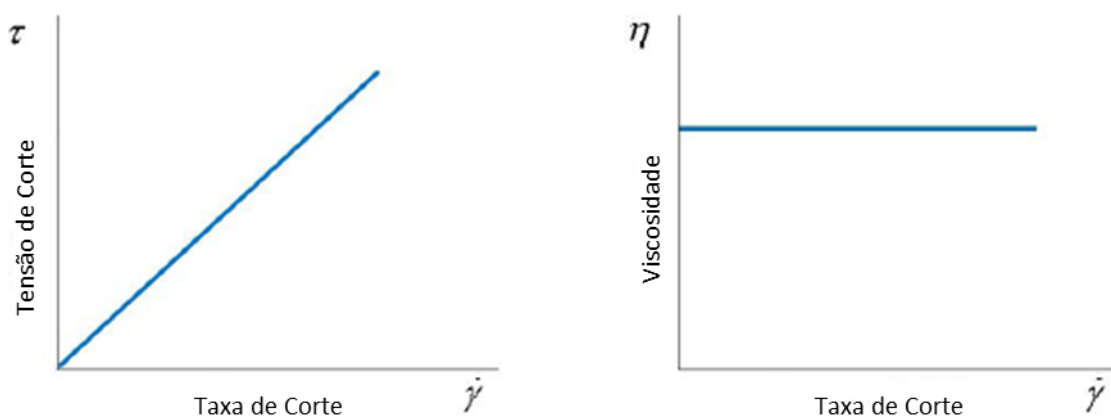


Figura 2.3 – Comportamento reológico dos materiais Newtonianos - Modificado de Yildirim et al., 2000

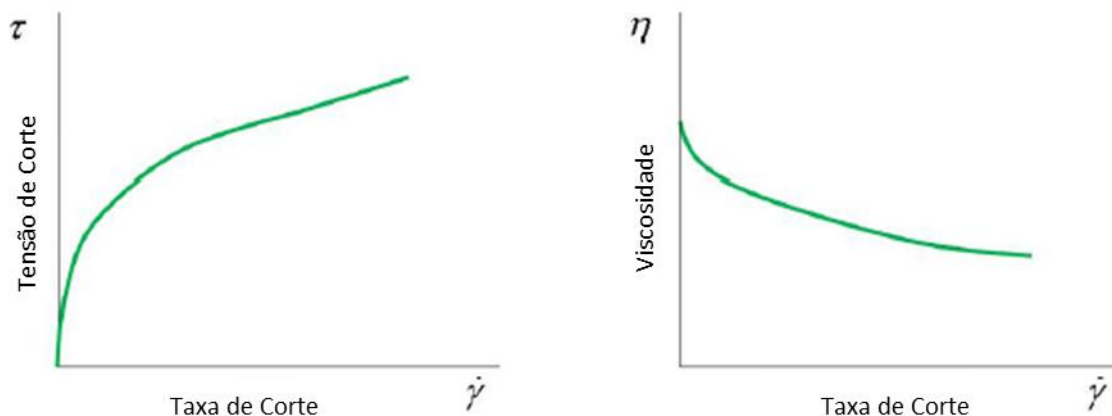


Figura 2.4 - Comportamento reológico dos materiais “shear-thinning” - Modificado de Yildirim et al., 2000

O ligante betuminoso pode apresentar-se puro, emulsionado, fluidificado ou modificado. Os ligantes modificados são o resultado do betume puro pela adição de aditivos, polímeros ou alterações químicas. O Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), é um polímero elastômero-termoplástico, que permite elevação do ponto de amolecimento (redução da susceptibilidade térmica), aumento da viscosidade (maior coesão e adesão do agregado ao ligante), e aumento da recuperação elástica (aumento da resistência à deformação permanente e ao envelhecimento) (Philipe & Filho, 2009).

Os betumes modificados são geralmente empregues no fabrico de betão betuminoso drenante, rugoso ou em outras misturas betuminosas delgadas ou abertas. De uma forma geral é dada preferência aos betumes modificados com polímero (PMB) em zonas de grande tensão, tais como, estradas com elevado volume de tráfego, cruzamentos de ruas movimentadas, aeroportos, estações de pesagens de veículos e pistas de corridas (Yildirim, 2007).

2.1.2. Agregados

O agregado mineral representa grande parte do volume nas misturas betuminosa, por esse motivo tem grande influência no seu desempenho. Os agregados grossos garantem estabilidade, aumentam a resistência mecânica (incremento do módulo de rigidez) e asseguram rugosidade superficial essencial à circulação dos veículos. Os agregados finos, de dimensões inferiores a 2,00 mm, permitem que as misturas betuminosas obtenham estabilidade e compacidade. O material de enchimento (fíler), é responsável pela compacidade e impermeabilidade da mistura betuminosa, para além de ter uma grande influência no seu comportamento, consoante as suas características físicas e químicas (Silva, 2005).

Matos (2012) afirma que a adição de fíler aos betumes, provoca um aumento da viscosidade e da temperatura de amolecimento e uma redução da penetração. No entanto, segundo Motta e Leite (2000), quando a percentagem de material que passa no peneiro 200 é excessiva, a estabilidade do esqueleto mineral começa a ficar comprometida pois os contactos entre as partículas grossas começam a diminuir, piorando assim a capacidade de compactação da mistura.

As características dos agregados a considerar para a sua utilização em pavimentos são a granulometria, forma, absorção de água, resistência ao choque e ao desgaste, dureza, limpeza, adesividade, massa específica aparente, densidade real e aparente do grão (NP EN 13043, 2004).

Em função da granulometria dos agregados, as misturas betuminosas podem ser classificadas em contínuas, descontínuas ou uniformes (Bernucci et al., 2008). A representação gráfica das curvas granulométricas das diferentes misturas betuminosas pode ser visualizada na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Uma curva granulométrica contínua é bem graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios, uma vez que estes são preenchidos por agregados finos. As curvas granulométricas uniformes são constituídas por agregados do mesmo tamanho, dando origem a um esqueleto mineral com elevado volume de vazios, devido a uma insuficiência de material fino que preencha os espaços entre as partículas de grande dimensão. Por sua vez, as misturas descontínuas caracterizam-se por uma granulometria com proporções de agregado de grandes dimensões e agregado fino dominantes relativamente aos agregados de tamanho intermédio. A presença de material fino permite tornar o esqueleto mineral mais resistente, aumentando o contacto entre os agregados grossos.

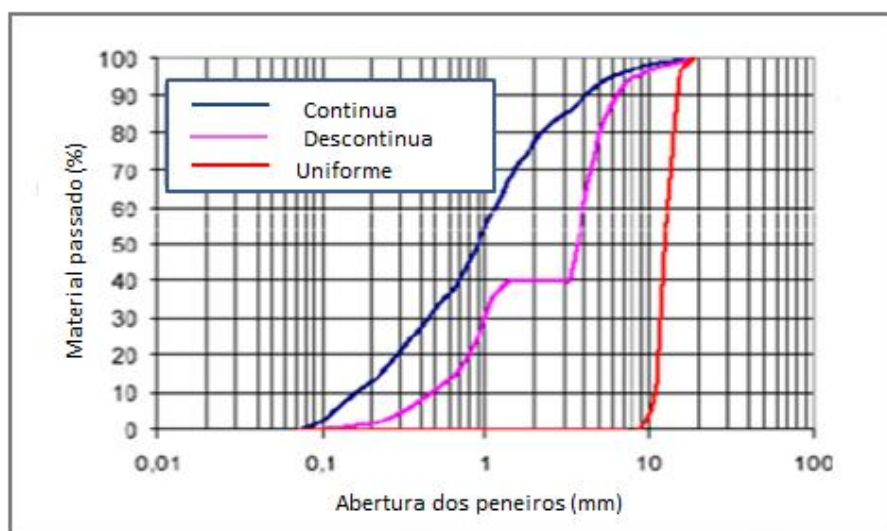


Figura 2.5 – Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas betuminosas – Effting, 2013

Consoante a granulometria e a percentagem de betume presente nas misturas betuminosas, estas podem ser classificadas em função da sua porosidade (V_v), em misturas “abertas”, “semi-densas” e “densas”. No entanto, as gamas de valores de porosidade correspondentes a cada uma das categorias não estão uniformizadas internacionalmente (Batista, 2004).

Segundo um estudo realizado em finais da década de 80 no LNEC, a porosidade das misturas betuminosas para cada uma das classes assumia os valores apresentados no Quadro 2.1, enquanto o Dicionário Técnico da AIPCR especifica as percentagens de vazios indicadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.1 – Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (Azevedo, 1987 citado em Batista, 2004)

Misturas betuminosas	
Misturas densas	$V_v \leq 6\%$
Misturas semi-densas	$6\% < V_v \leq 12\%$
Misturas abertas	$V_v > 12\%$

Quadro 2.2 - Classificação de misturas betuminosas segundo a porosidade (AIPCR, 1990 citado em Batista, 2004)

Misturas betuminosas	
Misturas densas	$V_v \leq 10\%$
Misturas semi-densas	$10\% < V_v \leq 15\%$
Misturas abertas	$V_v > 15\%$

2.2. Produção de Misturas Betuminosas

2.2.1. Fabrico

A produção de uma mistura betuminosa começa pela mistura dos agregados e do betume a uma determinada temperatura de mistura, sendo posteriormente compactada a uma temperatura de compactação. De acordo com a EAPA (*European Asphalt Pavement Association*), as misturas betuminosas podem ser classificadas consoante a gama de temperaturas envolvidas no seu processo de fabrico e compactação em misturas a frio, misturas semi-temperadas (*Half-Warm Asphalt*), misturas temperadas (WMA) e misturas a quente (HMA), (Figura 2.6).

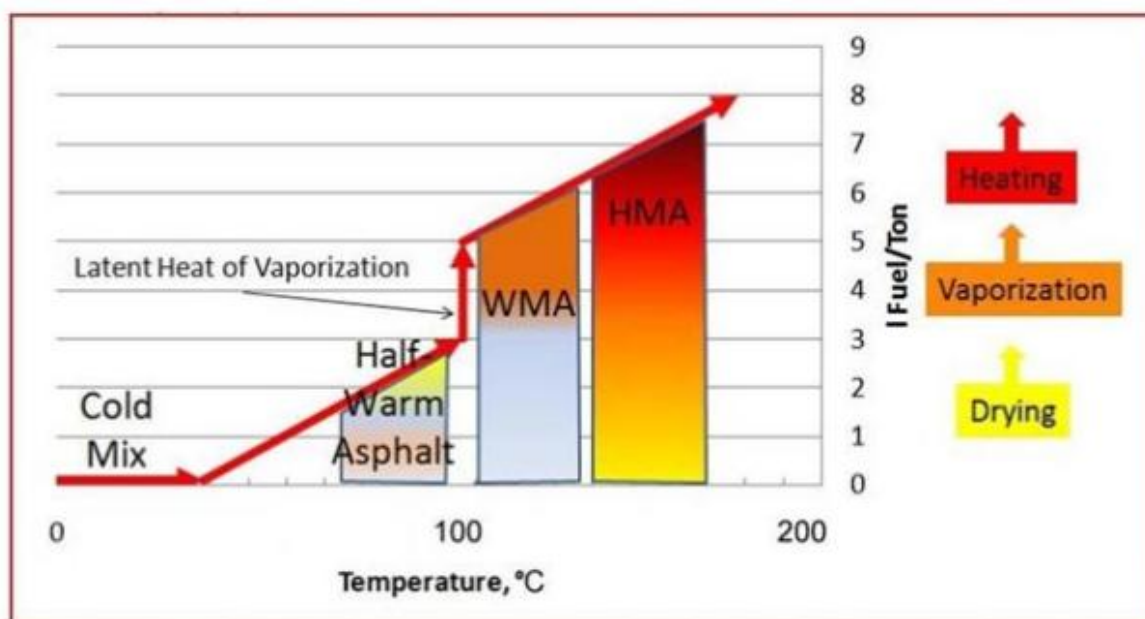


Figura 2.6 – Classificação das misturas betuminosas em função das temperaturas de mistura – EAPA, 2010

Misturas a Quente

Para uma mistura betuminosa a quente as temperaturas de produção encontram-se no intervalo dos 120°C aos 190°C, consoante o betume a utilizar (EAPA, 2010).

Cada uma dessas temperaturas tem um papel fundamental, assim a temperatura de fabrico é essencial para garantir que o betume tem a viscosidade necessária para que este envolva adequadamente os agregados durante o processo. Se a temperatura de mistura for demasiado elevada, o betume vai ter uma viscosidade baixa, que resulta no escoamento do betume após o envolvimento dos agregados, para além de potenciar a degradação do betume levando ao seu envelhecimento. Para temperaturas demasiado baixas, resulta a situação inversa, o betume vai apresentar uma viscosidade elevada o que leva ao deficiente envolvimento dos agregados (Yildirim et al., 2000 e Santos, 2011).

Relativamente à temperatura de compactação, esta tem como objecto garantir que as partículas de agregado constituam uma estrutura compacta, resistente, durável, coesa e com o volume de vazios definido no projecto. Assim durante o processo de compactação é importante que esta temperatura não seja demasiado elevada, para garantir que o betume tem viscosidade suficiente que permita a coesão da mistura, de forma a suportar os esforços transmitidos durante a compactação sem originar descompactações sucessivas. Por outro lado, se esta temperatura for demasiado baixa, o betume vai apresentar uma viscosidade demasiado elevada, reduzindo a trabalhabilidade da mistura pelo aumento da resistência à reorganização dos agregados, dificultando a compactação (Yildirim et al., 2000 e Santos, 2011).

Misturas a Frio

Ao contrário das misturas betuminosas a quente, em que se procede ao aquecimento do betume de modo a obter uma viscosidade adequada ao fabrico, espalhamento e compactação da mistura betuminosa, nas misturas a frio a diminuição da viscosidade do betume é conseguida através da sua incorporação na mistura sob a forma de emulsão betuminosa (emulsão de betume em água), (Cepso, 2007 e Batista, 2004).

Misturas Semi-Temperadas

De acordo com a EAPA, as misturas semi-temperadas caracterizam-se por serem produzidas a temperaturas inferiores a 100°C, usualmente entre os 70°C e os 100°C (EAPA, 2010). Presentemente a produção deste tipo de misturas é possível através da tecnologia da emulsão (emulsão com teor em água de 30%), através de técnicas de espuma de betume ou por processos LEA (*Low Energy Asphalt*). O processo LEA resulta da capacidade do ligante anídrico quente produzir espuma ou de se emulsionar, quando em contacto com a água residual dos agregados com temperaturas um pouco inferiores a 100°C, permitindo assim, o revestimento dos agregados a temperaturas baixas (Olard & Romier, 2012 citado em Barbosa, 2012).

Misturas Temperadas

As misturas temperadas são produzidas a temperaturas entre os 100°C e os 140°C, a sua produção envolve várias técnicas que permitem a redução da viscosidade efectiva do ligante, permitindo o revestimento integral dos agregados durante a fase de mistura e compactação com aplicação de baixas temperaturas (Ferreira, 2009). De acordo com a EAPA as técnicas mais utilizadas são as técnicas de espuma ou a adição de aditivos químicos ou orgânicos (EAPA, 2010).

2.2.1.1. Determinação das Temperaturas de Mistura e Compactação

Os métodos Superpave e o Shell recorrem a intervalos de viscosidade para determinar as temperaturas de mistura e compactação em betumes puros, embora o primeiro tenha aplicabilidade em laboratório e o segundo em obra. No entanto, estes métodos quando aplicados a betumes modificados, resultam em temperaturas demasiado elevadas. Devido a este facto, o construtor é geralmente aconselhado pelo produtor do ligante quanto às temperaturas de fabrico recomendadas (FHWA, 2001).

Temperaturas recomendadas pelos produtores

A maioria dos fornecedores utiliza frequentemente o método definido para betumes puros, e ajustam os resultados com um incremento de temperatura variável consoante o conteúdo de polímero utilizado. Enquanto outros fornecedores utilizam um conjunto de valores de temperaturas de mistura e compactação com base unicamente no ligante e no sistema modificador. A experiência aponta para temperaturas de mistura entre os 160°C e 171°C e temperaturas de compactação na ordem dos 143°C a 155°C (West et al., 2010).

Método Superpave

O método Superpave tem por base o princípio *equiviscous* recomendado pelo *Asphalt Institute* em 1962. Este princípio utiliza o viscosímetro de haste rotativa para determinar as viscosidades a 135°C e 165°C, a uma taxa de corte de $6,8s^{-1}$. As temperaturas de mistura e compactação são obtidas para a gama de valores de viscosidade de $170\pm 20cSt$ e $280\pm 30cSt$ respectivamente. De acordo com o projecto de formulação Superpave, os intervalos anteriores mantêm-se, à excepção das unidades que agora surgem no Sistema Internacional, sendo representativas da viscosidade dinâmica, em $0,17\pm 0,02Pa.s$ e $0,28\pm 0,03Pa.s$ (West et al., 2010 e *Asphalt Institut*., 2011).

Método Shell

Segundo o método da Shell, a temperatura de mistura é determinada para uma viscosidade de 0,20 Pa.s, enquanto que a temperatura de compactação é estimada para um intervalo de valores mais amplo, 2,0 a 20 Pa.s, por ter em consideração os factores que afectam a compactação em obra, nomeadamente a distância a percorrer, tipo de compactação, vento, espessura da camada a compactar, condições atmosféricas, entre outras (Read & Whiteoak, 2003)

Diversos investigadores têm vindo a desenvolver novas metodologias, com o intuito de obterem temperaturas adequadas aos betumes modificados, sem comprometem a qualidade da mistura. Estas metodologias têm em conta a sensibilidade dos betumes modificados à variação da taxa de corte, tentando estimar o seu valor durante os processos de mistura e compactação, para posteriormente determinarem o valor da viscosidade do betume a essa taxa de corte.

Exemplos dessas recentes metodologias são os métodos da viscosidade a taxa de corte zero, da viscosidade a taxa de corte elevada, do fluxo de corte constante e o do ângulo de fase (West et al., 2010 e *Asphalt Institute*, 2011). Das metodologias desenvolvidas para os betumes modificados, será apenas abordado o método utilizado neste trabalho.

Viscosidade a taxa de corte elevada – (HSRV)

As viscosidades dinâmicas do betume são determinadas pelo viscosímetro de haste rotativa, para as temperaturas de 135°C e 165°C a uma taxa de corte de 500s^{-1} . O método designado original assenta nos valores definidos pelo princípio *equiviscous* ($0,17 \pm 0,02\text{Pa.s}$ e $0,28 \pm 0,03\text{Pa.s}$). Esse intervalo foi alterado para valores de viscosidade dinâmica de $0,275 \pm 0,03\text{Pa.s}$ e $0,550 \pm 0,06\text{Pa.s}$ inerentes às temperaturas de mistura e compactação respectivamente, passando este método a denominar-se HSRV-E (West et al., 2010 e Yildirim et al., 2006).

2.2.2. Compactação

A compactação permite a passagem da mistura de um estado solto para um estado denso, pela diminuição do volume de vazios (V_v), aumento do atrito entre as partículas de agregado e aumento da baridade da mistura. Este processo ocorre essencialmente devido a fenómenos de distorção e reorientação das partículas de agregado (Chadbourn et al., 1998 citado em Micaelo, 2008).

Uma compactação adequada permite um aumento da capacidade de suporte de cargas, devido ao aumento de pontos de contacto (forças de contacto inter-partículas menores), à diminuição do volume de vazios (material menos susceptível aos agentes climáticos) e a um arranjo estrutural mais estável (melhor organização das partículas). Desta forma, previne-se um fenómeno de pós compactação durante a acção do tráfego, evitando-se o aparecimento de irregularidades transversais e fendilhamento precoce do pavimento.

Uma compactação deficiente, que origine uma porosidade abaixo do intervalo de 2% a 4%, pode levar um material a assumir um comportamento hidráulico, originando por fluência, problemas de deformação permanente e exsudação do betume em determinadas condições de carregamento. Por outro lado, misturas com um volume de vazios acima do desejado, pode diminuir o módulo de rigidez dinâmico requerido (Figura 2.7), dificultando a absorção do estado de tensões, para além de não garantir a impermeabilidade desejada (Micaelo, 2008).

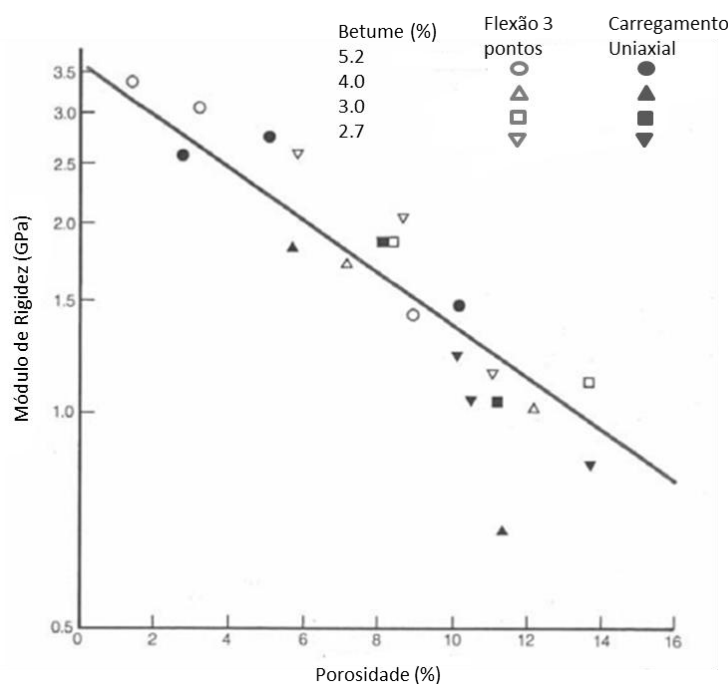


Figura 2.7 – Efeito da porosidade no módulo de rigidez dinâmica - Shell, 1990

De acordo com o exposto anteriormente, Kandhal (1983) verificou que os trechos que apresentavam maior desagregação possuíam um volume de vazios superior a 8% e que a severidade das falhas era proporcional à quantidade de vazios da mistura. Os mesmos autores, afirmam que uma mistura betuminosa projectada e construída adequadamente deve ter entre 6% e 8% de vazios logo após a construção e aproximadamente 4% após 2 ou 3 anos de serviço.

Compreende-se então, que para uma compactação adequada, é necessário conhecer o intervalo de porosidade que se pretende atingir aquando o processo de compactação de um pavimento. Esse intervalo é estimado durante o processo de formulação, através das características volumétricas de provetes compactados em laboratório, nomeadamente a baridade, a partir da qual se estima a porosidade e o volume de vazios na mistura de agregado (VMA).

Estes valores, são elementos indicativos de referência durante a compactação *in situ*, uma vez que o que se pretende, é que a compactação laboratorial, represente as condições do material em serviço, ou seja, que reproduza a soma da compactação de obra durante o processo de execução e da acção dos veículos pesados durante o período de vida útil do pavimento.

2.2.2.1. Compactação Laboratorial

A compactação de provetes cilíndricos em laboratório pode ser realizada pelo compactador de impacto (formulação de Marshall) ou pelo compactador giratório (formulação Superpave). Enquanto os provetes prismáticos são compactados pelo compactador Kneading (formulação Hveem e Smith) ou pelo compactador de rolo. Em obra, a compactação das misturas betuminosas pode ser realizada segundo a metodologia Inglesa, recorrendo a um compactador vibratório (Micaelo, 2008).

Apenas são descritas, a compactação por impacto através do compactador de Marshall e a compactação através do compactador de rolo, por serem os processos envolvidos no âmbito deste trabalho.

Compactador de Impacto (Marshall)

O compactador por impacto, designado correntemente por compactador de Marshall, foi desenvolvido nos anos 30 do século XX por Marshall, e é ainda hoje correntemente utilizado (Figura 2.8).

O procedimento consiste em compactar uma amostra por impacto num molde cilíndrico, com diâmetro interior de $(101,6 \pm 0,1)$ mm através da queda de uma massa deslizante com (4550 ± 20) g a uma altura fixa de (460 ± 3) mm num determinado número de vezes (25, 50, 75 ou 100), em cada topo do provete. O número de pancadas a aplicar é função do volume de tráfego estimado. Este método não é adequado a mistura betuminosas com máxima dimensão do agregado superior a 22,4 mm.

O método permite uma pequena reorientação das partículas de agregado e por vezes provoca mesmo a degradação deste. É um método que se afasta bastante da técnica aplicada em obra, e que consequentemente conduz a misturas com distribuição dos componentes bem distinta da verificada na mistura betuminosa colocada na camada do pavimento (Micaelo, 2008).



Figura 2.8 – Compactador de impacto Marshall (Laboratório NIDIn)

Compactador de rolo

Este tipo de compactador é o que aproxima melhor as condições de laboratório às condições de obra. Inserido neste grupo, encontram-se o compactador com segmento de roda metálica, o cilindro metálico de rasto liso, rodas com pneumáticos e o compactador com placas metálicas deslizantes. Para as lajes executadas neste trabalho, foi utilizado um cilindro metálico de rasto liso (Figura 2.9), que permite a utilização em modo estático ou vibratório. As placas compactadas podem ter dimensões diversas, geralmente elevadas, que exigem uma grande quantidade de mistura, permitindo extrair um grande número de provetes, embora exijam equipamento de secagem, pesagem e mistura adequados às dimensões da laje (Micaelo, 2008).



Figura 2.9 – Cilindro metálico de rasto liso (Laboratório NIDIn)

2.2.2.2. Tempo Disponível para Compactação

O tempo disponível para a compactação é o intervalo de tempo durante o qual se consegue uma compactação adequada. A eficiência da compactação de uma mistura depende de diversas variáveis como, suporte de base, temperatura do ar, humidade ambiente, nível de radiação solar, espessura da camada betuminosa e da temperatura inicial da mistura no momento da compactação (Robert et al., 1996).

Durante a compactação pretende-se que o betume/mastique actue como um lubrificante de modo a permitir que as partículas de agregado se reorganizem dando origem a uma estrutura compacta, resistente e durável. Para que tal seja possível é necessário que a compactação aconteça a uma temperatura adequada, sendo esta a que oferece menor resistência à tensão de corte. Desta forma, para temperaturas demasiado altas o betume apresenta uma viscosidade baixa, aumentando a resistência à compactação devido ao maior contacto entre as partículas. No caso inverso, em que a temperatura

é inferior à adequada, o ligante tem viscosidade elevada, tornando a massa demasiado coesa com maior dificuldade na movimentação das partículas, aumentando consequentemente a resistência à tensão de corte (Sombre et al., 1998).

Quando o ligante arrefece abaixo da temperatura de 85°C, torna-se muito viscoso e a compactação fica extremamente difícil. Portanto, é de grande importância que a mistura betuminosa seja compactada dentro da faixa de temperatura adequada para que a compactação seja eficiente.

A temperatura da mistura betuminosa após o espalhamento, é elevada e homogénea embora vá diminuindo devido às trocas de calor com o meio ambiente, mais frio, até o sistema se encontrar em equilíbrio térmico, este intervalo é chamado período de arrefecimento. O tempo disponível para a compactação consiste no intervalo desde o espalhamento da mistura até à fase inicial do período de arrefecimento, ou seja, até ao momento em que a mistura atinge uma temperatura que não permite uma compactação eficiente.

Segundo Micaelo (2008), o intervalo de tempo que permite uma compactação adequada é função da espessura da camada, da temperatura do ar e da velocidade do vento. Camadas mais espessas conseguem reter uma temperatura elevada no seu interior durante bastante tempo, enquanto uma camada fina dispõe de menos de 5 minutos para se proceder à correcta compactação. Relativamente à velocidade do vento, se esta for elevada, a superfície arrefece mais rapidamente, endurecendo a mistura, levando ao aparecimento de fendas durante a passagem dos cilindros, mesmo que no interior da camada, a temperatura possa ser adequada à compactação.

Para se poder estimar o tempo referido, é necessário ter em conta as formas como a mistura betuminosa troca calor com o meio envolvente, nomeadamente, através de fenómenos de condução, caracterizado por um fluxo de calor entre camadas no sentido vertical, convecção definido pelas transferências de calor entre um meio sólido e um fluido e por radiação correspondente às transferências de energia calorífera, emitida sob a forma de ondas ou partículas, não sendo necessário um material como meio de propagação.

Não se pretende neste trabalho, descrever de uma forma detalhada a forma de estimativa do tempo disponível para compactação pelos fenómenos anteriores, uma vez que esta problemática se aplica de forma mais acentuada à compactação em campo. A compactação em laboratório realiza-se de uma forma relativamente rápida uma vez que área a compactar é pequena.

2.2.2.3. Compactabilidade

A compactabilidade é a relação entre a baridade ou a porosidade e a energia de compactação aplicada, sendo um indicador da trabalhabilidade da mistura betuminosa. A trabalhabilidade é a propriedade que determina a produção, manuseamento, colocação e compactação com uma aplicação mínima de energia (Micaelo, 2008). Segundo o mesmo autor, a importância da compactabilidade está relacionada com o período de tempo limitado para se proceder à correcta compactação.

A compactabilidade pode ser estimada em laboratório, através de um ensaio que permite estimar a variação da baridade dos provetes compactados ou a variação da altura dos mesmos, face a diferentes energias de compactação aplicadas. Os resultados do ensaio podem ser traduzidos numa representação matemática logarítmica (2.1) ou exponencial (2.2). A primeira equação aplica-se quando o ensaio é realizado com o compactador giratório ou vibratório, enquanto a segunda expressão é utilizada quando se recorre ao compactador de Marshall.

$$\rho = a + b \times \ln(S) \quad (2.1)$$

$$\rho = a + b \times e^{-S/c} \quad (2.2)$$

Nas equações anteriores, ρ é a baridade (g/cm^3), a e b são duas constantes que representam características do processo de compactação ou da mistura betuminosa, S é a energia de compactação e C é uma variável que representa a velocidade com a que a baridade se aproxima da máxima. Quanto maior for o seu valor mais difícil será a compactação. Esta relação pode ser observada na Figura 2.10.

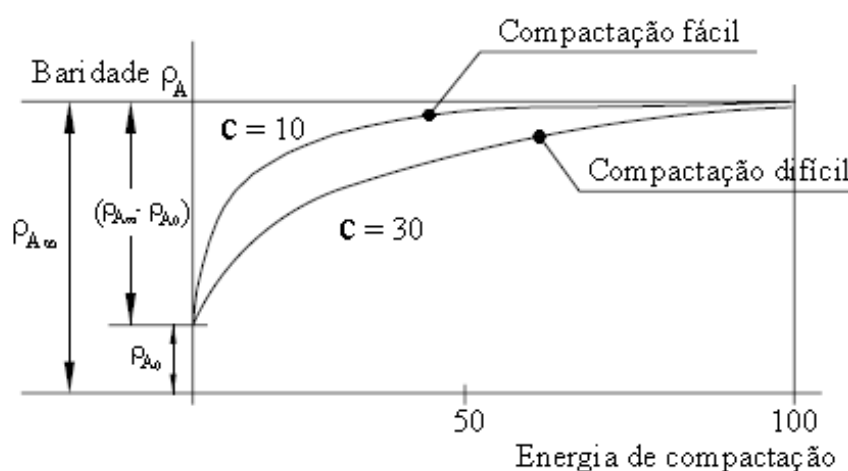


Figura 2.10 – Representação do factor C – Huerne, 2004

Vários são os factores que influenciam a compactabilidade das misturas betuminosas a quente, desde as características do material à temperatura envolvida no processo de compactabilidade, alguns deles são apresentados de seguida:

Betume/Temperatura:

Conforme referido anteriormente, a temperatura influencia a viscosidade do betume. Assim para betumes demasiado viscosos, a compactação torna-se extremamente difícil, pois a coesão da mistura impede a reorganização das partículas durante a compactação. Da mesma forma, um betume pouco viscoso permite o maior contacto entre partículas, dificultando a sua acção lubrificante, o que conduz a um aumento da resistência à compactação.

Agregados:

Renken (2004) citado em Micaelo (2008), concluiu que geralmente a resistência à compactação C aumenta com a diminuição de retidos no peneiro 2mm, e que a resistência à compactação é mínima para uma granulometria que conduza à máxima baridade da mistura (Figura 2.11).

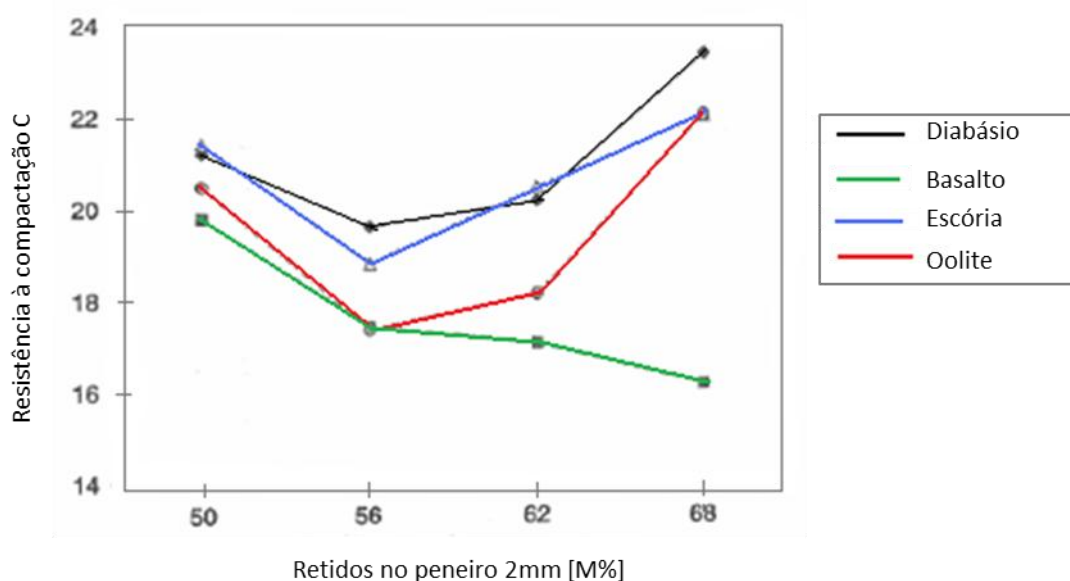


Figura 2.11 - Resistência à compactação relativamente à % de retidos no peneiro 2mm – Jonsson, 2000

A dimensão máxima do agregado (D_{max}), também influencia a compactação devido à sua relação com a espessura da camada. Teoricamente seria possível pavimentar uma camada com espessura igual a D_{max} , mas tal criaria problemas de fragmentação do agregado e formação de uma estrutura mineral inadequada, devido ao impedimento da reorganização das partículas.

Na prática estão especificadas espessuras com 3 a 4 vezes a dimensão nominal máxima das partículas, para que a compactação seja adequada. Jonsson (2000) faz referência a um estudo onde se concluiu que para quantidades pequenas de fíler este é benéfico, uma vez que a granulometria se torna contínua. No entanto, para quantidades elevadas de fíler, a rigidez do mastique aumenta tornando a mistura menos compactável (Figura 2.12).

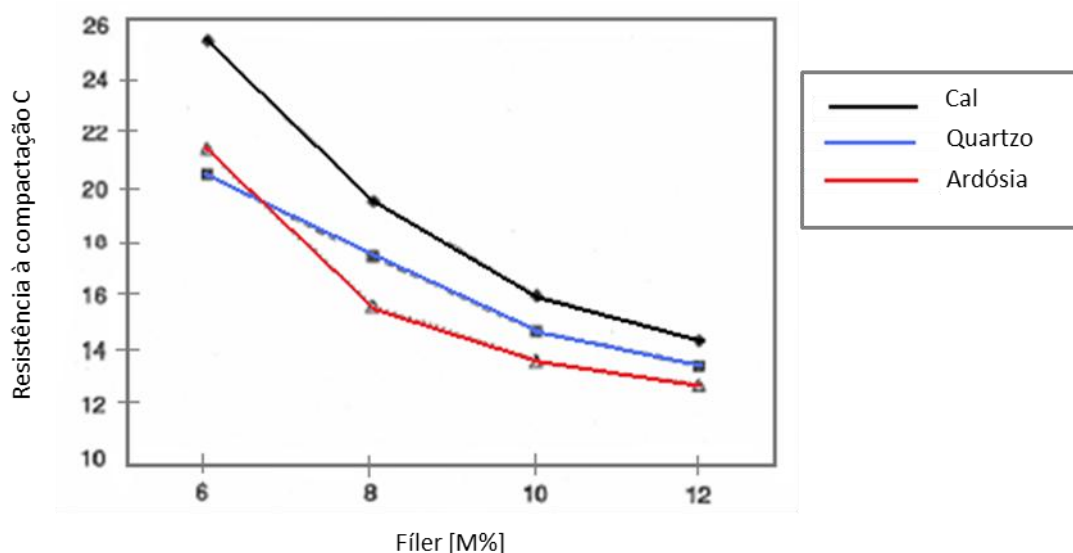


Figura 2.12 - Resistência à compactação C em relação à quantidade de fíler na mistura betuminosa – Jonsson, 2000

Relativamente à forma e rugosidade dos agregados, a experiência indica que agregados britados com forma aproximadamente cúbica e rugosa permitem obter um maior imbricamento das partículas de agregado, que conduz ao aumento da rigidez e que conseqüentemente aumenta a resistência à compactação.

Posto isto, é elaborado um quadro resumo com a influência dos vários parâmetros na compactabilidade das misturas betuminosas.

Quadro 2.3 – Influência dos parâmetros sobre a compactabilidade de misturas betuminosas (Micaelo, 2008)

Parâmetros		Variação	Efeito
Agregado	Granulometria	Descontínua a contínua	Melhora
	Textura	Diminuição	Melhora
	Forma	Alongada a cúbica	Irrelevante
	Relação espessura/D _{max}	Menor que 3	Dificulta
	Absorção	Aumento	Dificulta (se não prevista)
	Fíler	Aumento (baixas % totais)	Melhora
Betume	Quantidade	Aumento	Melhora
	Viscosidade	Aumento	Depende dos Valores

2.3. Características das Misturas Betuminosas

A relação percentual face ao peso total da mistura, de cada um dos constituintes (agregado e betume), é usualmente estabelecida com base num estudo de formulação (subcapítulo 3.3.1.3). A selecção de cada um dos componentes, e as quantidades de cada um a aplicar na mistura, são factores de extrema importância, pois são estes que vão ditar as características de uma mistura betuminosa. De acordo com Branco et al. (2011), pretende-se que o pavimento ao longo da sua vida útil apresente as características seguintes:

- Estabilidade – Consiste na capacidade de uma mistura betuminosa resistir à passagem repetida dos veículos com pequenas deformações. Esta característica é função do atrito interno dos materiais e da capacidade de coesão do betume. De uma forma geral, para V_v superior a 3%, esta propriedade aumenta com a compacidade do material e com a quantidade óptima de betume
- Durabilidade - É determinada pela capacidade de uma mistura betuminosa resistir ao desgaste causado pelo tráfego e de pelas acções climáticas (temperatura e água). De uma forma geral, a durabilidade aumenta com o incremento da quantidade de betume. Este confere maior resistência à desintegração da mistura e diminui o volume de vazios, dificultando assim o acesso da água ao seu interior. No entanto, uma percentagem de betume excessiva pode reduzir a estabilidade da mistura. Por esse motivo é importante que no processo de formulação se determine a quantidade de betume adequada. A utilização de uma curva granulometria contínua também melhora a durabilidade da mistura por torna-la mais impermeável.
- Flexibilidade - Garante que uma mistura betuminosa se adapta a assentamentos graduais das camadas inferiores, sem que ocorra fendilhamento do pavimento. A flexibilidade de uma mistura geralmente aumenta com o aumento da percentagem de betume e da utilização de agregados de granulometria aberta
- Resistência à Fadiga – Corresponde à resistência que uma mistura apresenta face às solicitações repetidas impostas pelas passagens dos veículos. A resistência à fadiga aumenta com a durabilidade da mistura, que está inerente ao aumento de betume. No entanto, uma grande percentagem de betume pode originar exsudação do ligante e comprometer a estabilidade da mistura.
- Impermeabilidade – É a resistência de uma mistura à passagem da água e do ar para as camadas subjacentes. Esta característica depende do volume de vazios, sendo que este pode ser equacionado através da curva granulométrica utilizada para formular a mistura betuminosa. Desta forma, quando se pretende uma mistura betuminosa com grande resistência à penetração da água, a curva granulométrica contínua será a mais adequada. Por outro lado, curvas granulométricas uniformes dão origem a misturas com características drenantes, estas

permitem que o escoamento da água ocorra no interior das camadas constituintes, diminuindo a percolação superficial e consequentemente favorecem uma maior segurança à circulação dos utentes.

- Compacidade - Propriedade relacionada com o arranjo estrutural dos agregados. Controlada pelo volume de vazios no esqueleto mineral (VMA) (Micaelo, 2008).
- Trabalhabilidade - Característica que garante condições adequadas de produção (fabrico e espalhamento) e compactação *in situ*.

Para além de todas as características já citadas, a textura desempenha um papel fundamental para a qualidade funcional da camada de desgaste de um pavimento. De acordo com Menezes (2008), a microtextura permite caracterizar uma superfície mais ou menos rugosa, possibilitando o contacto directo entre o pavimento e o pneu, mas suficientemente lisa a olho nu, permitindo uma circulação cómoda, segura e económica. Esta escala de textura é função do tipo de agregado e apresenta um papel preponderante a baixas velocidades, embora alguns investigadores acreditem que é importante para todas as velocidades.

De acordo com o mesmo autor, a macrotextura está relacionada com a proporção utilizada de cada agregado. Esta escala de textura, contribui para a componente de histerese do atrito e permite um escoamento rápido da água da superfície do pavimento, reduzindo a possibilidade de hidroplanagem.

Por forma a avaliar as características referidas, são realizados ensaios em laboratório, tais como: ensaios de sensibilidade à água, deformação permanente, resistência à fadiga e módulo de rigidez. Pretende-se que os resultados obtidos sejam um indicador do desempenho da mistura betuminosa, quando aplicada *in situ*.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Este capítulo apresenta a metodologia experimental desenvolvida para a produção de uma mistura betuminosa, fazendo variar a temperatura de fabrico e compactação em cada sistema de produção, por forma a avaliar a influência destas nas características mecânicas e no desempenho de uma mistura betuminosa em estudo. O esquema representado na Figura 3.1, resume as etapas desenvolvidas neste capítulo, descrevendo-se nos seguintes parágrafos as metodologias que o constituem.

A mistura betuminosa a estudar foi seleccionada previamente, tendo-se optado por um betão betuminoso rugoso (BBR). Este pode ser denominado de acordo com a designação definida na norma NP EN 13108-1:2008 como:

AC 14 surf PMB 45/80-65

sendo AC uma referência ao produto em causa, *Asphalt Concrete*, seguido da dimensão correspondente à abertura do primeiro peneiro que retém material, neste caso 14mm, posteriormente identifica-se a camada a que se destina a mistura, camada de desgaste, *surf* na nomenclatura inglesa, e por último é referida a gama de penetração do ligante utilizado e a temperatura de amolecimento.

O estudo experimental foi maioritariamente desenvolvido no laboratório do Núcleo de Investigação Desenvolvimento e Inovação (NIDIn), pertencente à empresa Probigalp Ligantes Betuminosos S.A., que disponibilizou as suas instalações para a realização dos ensaios referenciados ao longo deste capítulo. Este estudo contou também com a colaboração do Laboratório de Vias de Comunicação e Transporte pertencente ao Instituto Superior Técnico, onde se realizaram alguns ensaios que permitiram a conclusão deste trabalho.

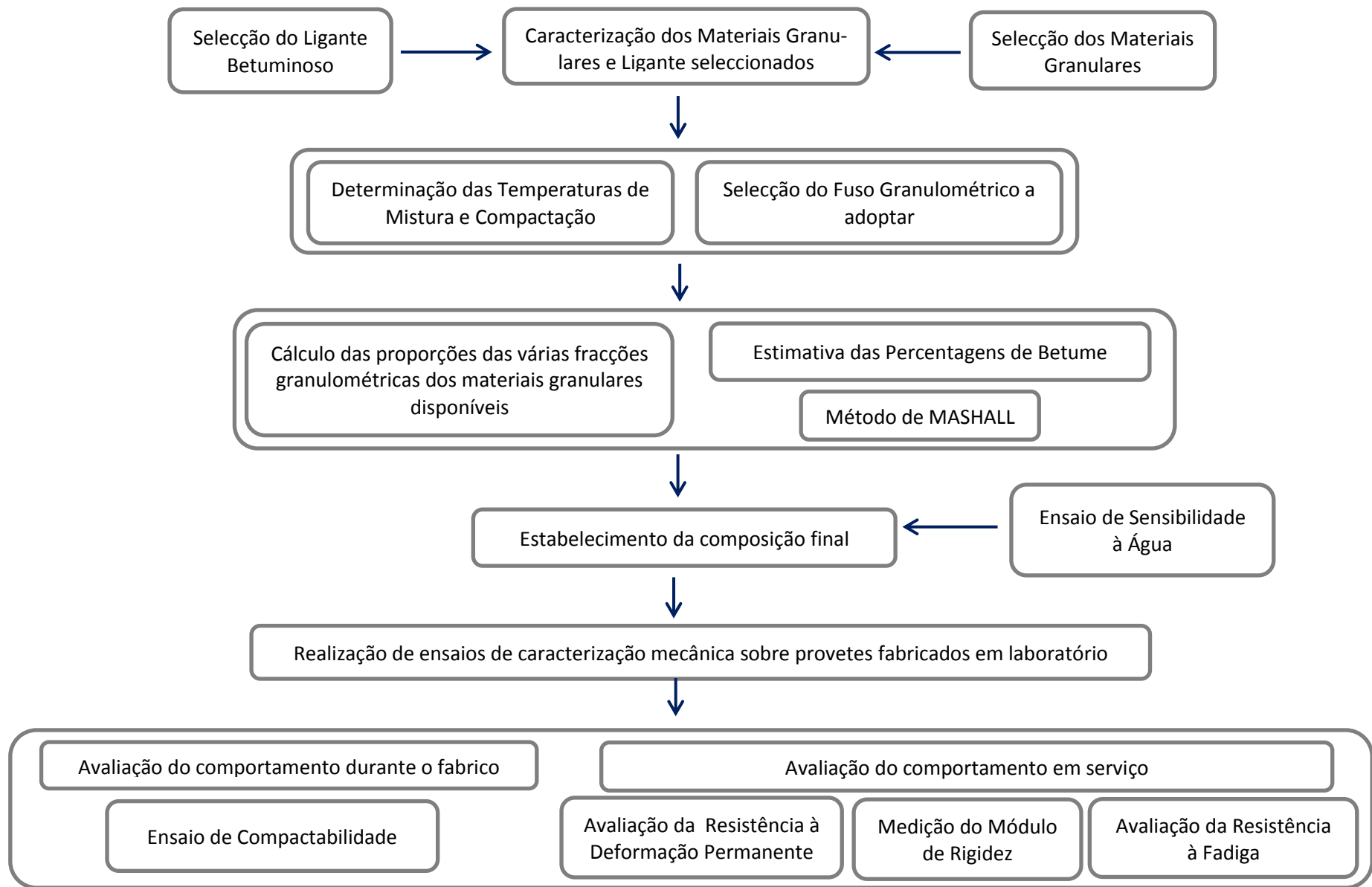


Figura 3.1 - Esquema do processo de estudo da mistura betuminosa

3.2. Caracterização dos Materiais Constituintes

3.2.1. Caracterização do Ligante Betuminoso

→ Processo de modificação do betume puro

O betume utilizado no estudo da mistura betuminosa a ensaiar, foi modificado em laboratório num sistema piloto, que reproduz o processo de modificação utilizado pela Probigalp, Figura 3.2.

Após a recolha do betume puro em latas metálicas de 5 litros de capacidade, inicia-se a mistura do betume a 150 rpm, num recipiente de modificação que é colocado sobre uma manta de aquecimento. O recipiente de mistura é mantido tapado, para evitar a máxima dissipação de calor e mantido a 170°C, sendo o controlo da temperatura realizado através de um termómetro digital imerso no betume.

O processo de modificação do betume puro prossegue com a adição do polímero SBS e o reagente NF100, numa proporção que permita obter um betume modificado PMB 45/80-65, sendo o primeiro intervalo de valores correspondente à gama de penetração pretendida e o último valor à temperatura de amolecimento. Após o processo de modificação divide-se o betume modificado em latas metálicas com 1 litro de capacidade, armazenam-se e etiquetam-se de acordo com a EN 58. O processo de modificação foi repetido o número de vezes necessárias para obter a quantidade de betume para o estudo completo.



Figura 3.2 - Sistema piloto de modificação do betume puro (Laboratório NIDIn)

→ Viscosidade Dinâmica do Ligante

O ensaio de viscosidade dinâmica do betume realiza-se em conformidade com a EN 13320:2010. Este procedimento permite conhecer o comportamento do betume a temperaturas elevadas para vários tipos de condições (temperatura, pressão, taxa de corte e tempo de carregamento). Para a realização do ensaio recorre-se ao viscosímetro de haste rotativa Brookfield DV-II+Pro, associado a um dispositivo de controlo de temperatura Thermosel, Figura 3.3.

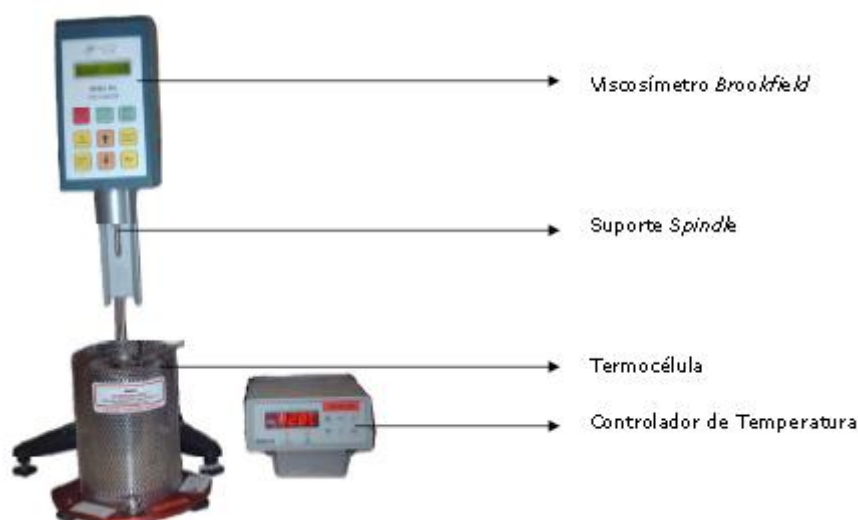


Figura 3.3 – Viscosímetro Rotacional Brookfield DV-II+Pro (Laboratório NIDIn)

Previamente à realização do ensaio, prepara-se a amostra de acordo com o método definido na EN 12594:2007 e procede-se à sua estabilização térmica juntamente com os componentes do aparelho directamente envolvidos na medição. Para tal, imerge-se uma haste no recipiente contendo a amostra de betume, sendo o conjunto introduzido no controlador de temperatura do equipamento, onde permanece 15 a 30 minutos à temperatura de ensaio previamente seleccionada.

Após este período, selecciona-se a velocidade de rotação a aplicar à haste, em rotações por minuto (rpm), e dá-se início ao ensaio. O aparelho determina o valor do binário necessário para manter essa velocidade constante e calcula os valores de taxa de corte (SR) e tensão de corte (SS) associados. Com base nestes parâmetros são apresentados os valores da viscosidade dinâmica em centipoise (cP). As leituras realizaram-se a $(60 \pm 0,5)$ segundos, após o início do ensaio.

Para efeitos de caracterização do betume, realiza-se o ensaio a 135°C, que é a temperatura de controlo definida pela norma do produto de betumes modificados. Foi utilizada a haste nº.27, sendo esta a intermédia, das três hastes disponíveis, numeradas consoante o seu diâmetro em nº. 21 (maior diâmetro), nº. 27 (diâmetro intermédio) e nº.28 (menor diâmetro). A selecção da haste adequada é a que conduz a medições de viscosidade inerentes a valores de binário superiores ou iguais a 20% do intervalo de trabalho da haste para as condições de teste definidas.

3.2.2. Caracterização dos Agregados

→ Análise Granulométrica

A análise granulométrica dos agregados com dimensão nominal até 63mm, realiza-se por meio de peneiração, segundo o método descrito na NP EN 933-1:2000.

A massa total de agregado reduz-se ao provete de ensaio, por aplicação do procedimento definido na EN 932-2. Prossegue-se com a lavagem do provete, previamente pesado. Seca-se a amostra a $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ até alcançar massa constante e pesa-se novamente a massa do provete.

Coloca-se o provete lavado e seco, numa coluna de peneiros da marcação CE, constituída pela combinação da série base e série 2, disposta de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas dos peneiros. Primeiramente submete-se o conjunto a agitação mecânica (Figura 3.4), sendo posteriormente cada peneiro sujeito a agitação manual para a completa separação do material. Por fim, pesa-se o material retido em cada peneiro. Com as massas registadas anteriormente calculam-se as percentagens de massa passada em cada um dos peneiro.



Figura 3.4 – Conjunto de peneiros da marcação CE sujeitos a agitação mecânica (Laboratório NIDIn)

→ Determinação das Massas Volúmicas

A determinação das massas volúmicas e absorção de água realiza-se em conformidade com a NP EN 1097-6:2003. Constam na mesma norma vários métodos, cuja aplicabilidade depende da granulometria do agregado a estudar. Desta forma, denomina-se neste trabalho por método A, o procedimento incluso na norma para os agregados com dimensões entre 0,063mm e 4mm, por método B a metodologia adequada a agregados com partículas entre os 4mm e 31,5mm e por método C o procedimento a aplicar em agregados com dimensões entre 31,5mm e 63mm.

Método A

Neste trabalho denomina-se por método A, o procedimento de determinação das massas volúmicas e absorção de água para agregados cujas dimensões compreendem o intervalo de 0,063mm e 4mm. Este método é definido na norma como o método do picnómetro.

Anteriormente à realização do ensaio, a amostra de agregado deve reduzir-se a uma massa igual ou superior a 1kg pelo procedimento definido na EN 932-2. Lava-se o provete sobre o peneiro de 4mm e 0,063mm e deixa-se o mesmo imerso em água durante um período de $(24 \pm 0,5)$ h.

Após o período de imersão, coloca-se o provete no interior do picnómetro com água, e remove-se todo o ar ocluído fazendo rodar e agitando cuidadosamente o picnómetro. Posteriormente, faz-se transbordar o picnómetro por adição de água e coloca-se uma tampa para impossibilitar a entrada de ar no seu interior (Figura 3.5). Seca-se o picnómetro por fora, pesa-se (M_2) e regista-se a temperatura da água (Figura 3.6).

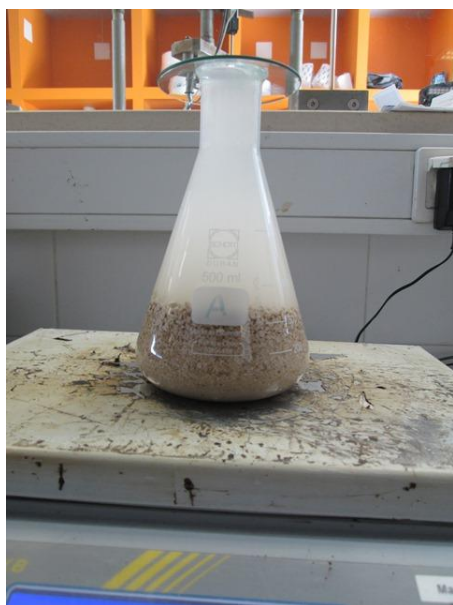


Figura 3.5 – Picnómetro com água e amostra após remoção do ar do seu interior (Laboratório NIDIn)



Figura 3.6 – Registo da temperatura da água no interior do picnómetro (Laboratório NIDIn)

Retira-se a água do picnómetro e coloca-se o provete sobre um tabuleiro distribuído numa camada uniforme. Expõe-se o provete a uma corrente de ar morno por forma a eliminar a humidade superficial visível, remexendo o provete para garantir uma secagem homogénea. Coloca-se o provete previamente arrefecido no interior de um molde troncocónico de metal sobre a base de um tabuleiro. De seguida compacta-se levemente o provete com um pilão com 25 pancadas (Figura 3.7). Aquando a retirada do molde, se o provete mantiver a sua forma troncocónica, prossegue-se com o processo de secagem até que o cone de agregado se deforme após desmoldagem (Figura 3.8).



Figura 3.7 – Apiloamento do provete no interior do molde troncocónico (Laboratório NIDIn)



Figura 3.8 – Forma do provete após desmoldagem (Laboratório NIDIn)

Pesa-se o provete saturado com superfície seca (M_1), resultante do processo anterior e após secagem a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ até massa constante (M_4). Regista-se também o peso do picnómetro com água (M_3).

Com os valores registados durante o procedimento é possível calcular a massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a) pela equação (3.1), a massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) através da equação (3.2) e a massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca (ρ_{ssd}) e absorção de água (WA_{24}) de acordos com as expressões (3.3) e (3.4) respectivamente.

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \quad (3.1)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \quad (3.2)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)] / \rho_w} \quad (3.3)$$

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (3.4)$$

Onde, M_1 é a massa do agregado saturado com a superfície seca ao ar, M_2 é a massa do picnómetro contendo o provete saturado, M_3 é a massa do picnómetro apenas cheia de água e M_4 é a massa ao ar do provete seco em estufa. As massas são apresentadas em gramas.

Método B

Como referido anteriormente, o método B tem aplicabilidade em agregados com dimensões entre 4mm e 31,5mm. De acordo com a respectiva norma, a determinação das massas volúmicas e absorção de água deste tipo de agregados, realiza-se recorrendo ao picnómetro também utilizado no método A, embora com algumas diferenças no que diz respeito ao seu procedimento.

Em concordância com o método anterior, a massa de agregado é reduzida pelo procedimento descrito na EN 932-2 a uma massa superior a um valor mínimo que varia consoante a máxima dimensão do agregado. Lava-se o provete sobre o peneiro de 31,5mm e 4mm e deixa-se o mesmo imerso em água durante um período de $(24 \pm 0,5)$ h.

De seguida, o provete é colocado no interior do picnómetro juntamente com água e procede-se à remoção do ar presente no interior do mesmo, conforme foi explicado no método A (Figura 3.5). Pesa-se o conjunto (M_2) e regista-se a temperatura da água (Figura 3.6).

Remove-se a água do picnómetro deixando-a escorrer durante alguns minutos, transfere-se o provete para cima de uns panos secos e seca-se cuidadosamente por forma a absorver as partículas de água visíveis (Figura 3.9). Transfere-se o provete com a superfície seca para um tabuleiro, regista-se a sua massa antes e depois de seco a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ até massa constante como (M_1) e (M_4) respectivamente. Por último pesa-se o picnómetro com água (M_3) e regista-se a temperatura da mesma.



Figura 3.9 – Absorção das partículas visíveis d água no provete (Laboratório NIDIn)

Para o cálculo das massas volúmicas e percentagem de absorção de água, recorre-se às fórmulas (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4) anunciadas no método A.

Método C

O método C é definido na norma como o método do cesto de rede metálica e aplica-se a agregados com partículas de dimensão entre 31,5mm e 63mm. No entanto este método pode ser utilizado como alternativa ao método do picnómetro para agregados entre 4mm e 31,5mm.

Em consonância com os métodos anteriores, a massa de agregado reduz-se a um provete com massa superior ou igual a um valor mínimo dependente da máxima dimensão do agregado em estudo. O provete é deixado em água durante um período de $(24 \pm 0,5)$ h, previamente lavado sobre o peneiro 63mm e 31,5mm.

Coloca-se o provete saturado no interior do cesto de rede metálica (Figura 3.10), seguidamente, o conjunto é introduzido num tanque com água (Figura 3.11), de modo que esta tenha uma altura de pelo menos 50mm acima do topo do cesto. Remove-se o ar ocluído no provete, fazendo o cesto bater 25 vezes no fundo do tanque, aproximadamente uma vez por segundo. Regista-se temperatura da água assim que a massa imersa do conjunto (M_2) seja determinada.



Figura 3.10 – Cesto de rede metálica utilizado para o cálculo de massas volúmicas e absorção de água pelo método C (Laboratório NIDIn)



Figura 3.11 – Tanque com água utilizado para cálculo de massas volúmicas e absorção de água pelo método C (Laboratório NIDIn)

Posteriormente, retira-se o cesto da água e deixa-se escorrer o durante alguns minutos. O agregado é colocado sobre um pano seco e limpam-se as partículas cuidadosamente de forma a eliminar a película de água visível. Regista-se a massa do agregado com superfície seca como M_1 .

De seguida, transfere-se o provete para um tabuleiro que é colocado na estufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, e pesa-se a sua massa de agregado quando esta atingir um valor constante (M_4). Por fim, coloca-se o cesto vazio no tanque com água e pesa-se o mesmo imerso, registar como M_3 .

Com os valores registados durante o procedimento, é possível determinar o valor das massas volúmicas e absorção de água pelas expressões apresentadas na método A.

3.3. Produção de Misturas Betuminosas

3.3.1. Fabrico

3.3.1.1. Método de Determinação das Temperaturas de Mistura e Compactação

As temperaturas de mistura e compactação são determinadas com base nos valores de viscosidade dinâmica obtidos com o viscosímetro de haste rotativa Brookfield DV-II+Pro, Figura 3.3.

Tanto os valores da viscosidade dinâmica como os restantes parâmetros (binário, tensão de corte e taxa de corte), são determinados pelo processo descrito no subcapítulo 3.2.1, referente à caracterização do ligante betuminoso.

Para determinar com a maior precisão possível os valores das temperaturas de produção, medem-se as viscosidades para um intervalo de temperaturas entre os 130°C e os 190°C, fazendo um varrimento de todas as velocidades de rotação possíveis pelo equipamento, 2 rpm a 200 rpm, para cada uma das temperaturas consideradas.

De todas as medições realizadas, são preferencialmente considerados os valores de viscosidade dinâmica, para percentagens de esforço entre 20% e 90% do intervalo de trabalho da haste para as condições de teste definidas, como aconselhado na EN 13320-2010. Quando tal não é possível, assumem-se os valores de viscosidade correspondentes ao intervalo de 10% a 90%, respeitando assim as condições exigidas pelo equipamento. Os valores obtidos fora dos intervalos anunciados foram desprezados.

Sendo que o objectivo passa por conseguir o maior número de leituras possível, a selecção da haste tem um papel preponderante, uma vez que a selecção adequada desta, varia consoante a temperatura e a velocidade de rotação. Assim, à medida que se aumenta a temperatura, como o betume fica mais fluído é necessário aumentar o diâmetro da haste por forma a garantir uma percentagem de esforço superior a 20%. Por outro lado, para uma temperatura constante, à medida que aumenta a velocidade de rotação é necessário diminuir o diâmetro da haste, por forma a não ultrapassar os 90% de binário (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Esquema representativo da selecção da haste consoante as condições de ensaio

Para as condições de teste estudadas, não se atingiram os valores de taxa de corte definidos em cada um dos métodos a estudar, sendo por esse motivo necessário extrapolar os valores de viscosidade dinâmica obtidos, para os valores de viscosidade dinâmica correspondentes às taxas de corte pretendidas. Para tal, recorreu-se ao modelo reológico de Cross (3.5), sendo este o modelo mais comum para expressar matematicamente a relação entre a viscosidade e a taxa de corte de materiais não Newtonianos do tipo “*shear-thinning*” (Barnes, 2000 e Barnes et al., 1989). A determinação dos parâmetros do modelo foi realizado com recurso a um algoritmo programado no software Matlab.

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (K \times \dot{\gamma})^m} \quad (3.5)$$

Onde, η_0 e η_{∞} são respectivamente viscosidade a taxa de corte zero e a taxa de corte infinita (Figura 3.13), K é um parâmetro constante com a dimensão do tempo e m é uma constante adimensional.

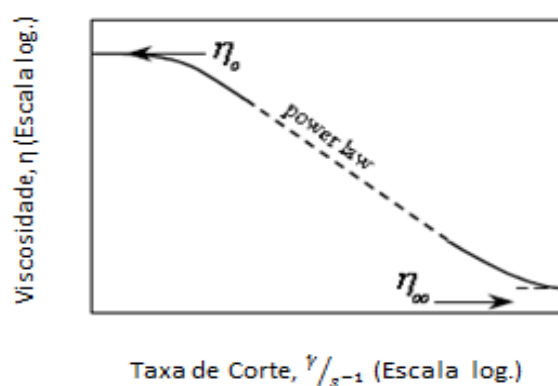


Figura 3.13 – Representação gráfica das viscosidades a taxa de corte zero (η_0) e infinita (η_{∞}) - Barnes, 2000

Os valores das viscosidades para um valor de taxa de corte constante, obtidos pelo método de Cross são representadas num gráfico em função da temperatura. Ao inserir uma linha de tendência, numa escala logarítmica, procura-se a recta com a melhor aproximação possível aos dados introduzidos, como representado na (Figura 3.14). Desta forma, consegue-se facilmente estimar os valores das temperaturas correspondentes aos intervalos de viscosidades pretendidos.

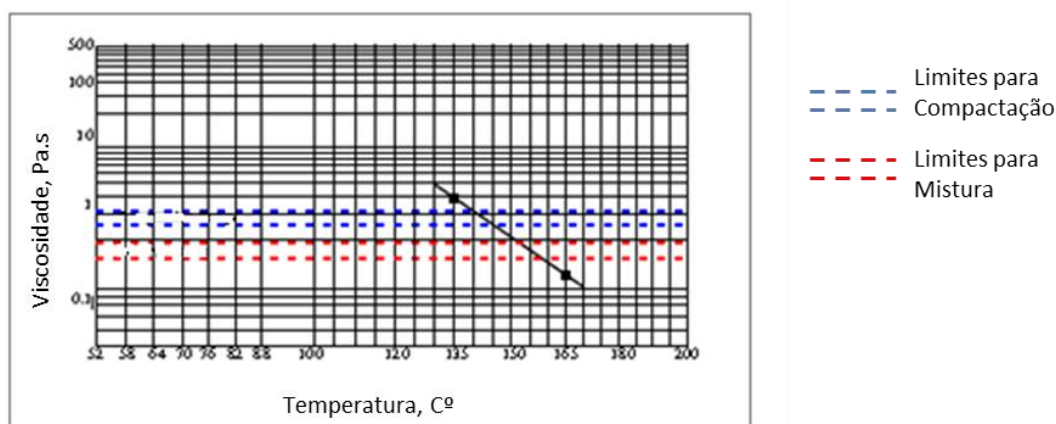


Figura 3.14 – Gráfico representativo da determinação das temperaturas de produção - Yildirim et al., 2000

3.3.1.2. Selecção do Fuso Granulométrico a adoptar

O fuso granulométrico adoptado para a formulação da mistura betuminosa é o aconselhado no Anexo Nacional da NP EN 13108-1:2008 para a mistura betuminosa rugosa, a aplicar em camadas de desgaste, previamente seleccionada, AC 14 *surf* PMB 45/80-65 (BBr).

3.3.1.3. Formulação da Mistura Betuminosa – Método de Marshall

Os métodos de formulação de misturas betuminosas têm como objectivo determinar as proporções de agregados e betume numa mistura, de tal modo que se obtenha um material de pavimentação tão económico quanto possível e com as características desejadas (Capitão et al., 2001).

De entre os métodos de formulação existentes (tipo receita, empíricos, analíticos, volumétricos, relacionados com o desempenho mecânico e baseados no desempenho mecânico da mistura), os empíricos são os mais utilizados na formulação de misturas betuminosas a quente (Silva, 2005).

Estes métodos assentam na realização de ensaios mecânicos simples, através dos quais se obtêm determinadas variáveis que devem respeitar certos limites estabelecidos com base na experiência anterior, permitindo assim conhecer o comportamento genérico de uma mistura betuminosa. No entanto as grandezas avaliadas ao longo do processo não permitem em geral determinar as propriedades intrínsecas do material nem medidas do seu comportamento mecânico (Capitão et al., 2001).

Neste trabalho recorre-se ao método de Marshall, exemplo de um método empírico, para a formulação da mistura betuminosa. De acordo com o Anexo Nacional da NP EN 13108-1:2008, realiza-se uma mistura de agregados, de maneira a que a curva granulométrica resultante, respeite o fuso característico da mistura que se pretende obter. Depois de determinada a curva granulométrica, o mesmo anexo, propõe a realização de cinco grupos de três provetes, fazendo variar entre grupos a percentagem de betume, com incrementos de 0,5% relativamente à massa total da mistura. As percentagens de betume a estudar foram previamente seleccionadas, de forma a que pelo menos dois conjuntos apresentem percentagens de betume abaixo do valor óptimo expectável (4% e 4,5%) e dois valores acima (5,5% e 6%).

Depois de produzida, parte da mistura é compactada, sendo a restante deixada na forma solta. Sobre os provetes compactados é determinada a baridade aparente (ρ_b) e sobre parte da mistura solta determina-se a baridade máxima teórica (ρ_{mv}). Com os valores das duas grandezas referidas anteriormente é possível obter os valores da porosidade (V_m), do volume de vazios na mistura de agregado (VMA) e os vazios preenchidos por betume (VFB). Por último realiza-se o ensaio de compressão de Marshall no qual é medida a força de rotura ou estabilidade (S) e a deformação correspondente (F). As etapas constituintes do método de Marshall estão representadas no esquema da Figura 3.15, e são descritas nos parágrafos que se seguem.

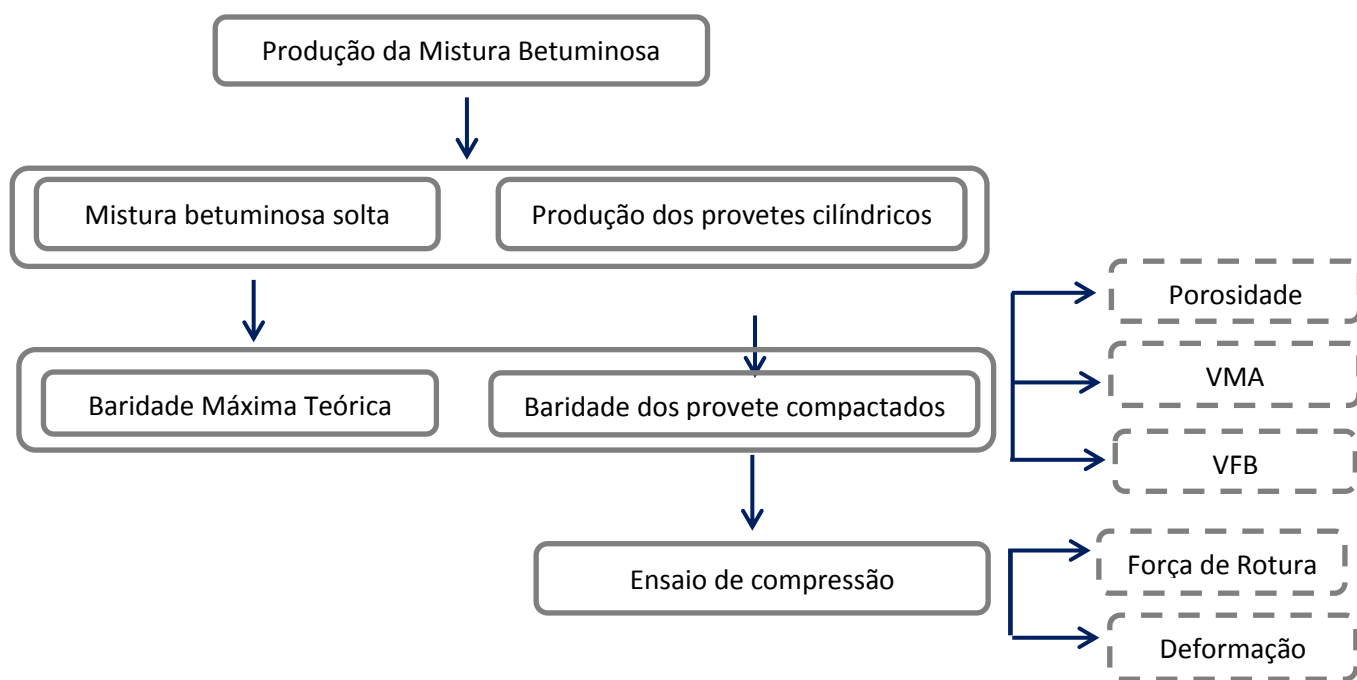


Figura 3.15 – Esquema das etapas constituintes do método de Marshall

→ Produção da Mistura Betuminosa

A produção da mistura betuminosa segue as etapas estabelecidas na EN 12697-35:2004+A1. Segundo a mesma, os agregados seleccionados pesam-se nas proporções calculadas anteriormente e colocam-se numa estufa à temperatura de mistura juntamente com o betume, durante cerca de 8h e $(2,5 \pm 0,5)$ h, respectivamente. Posteriormente, procede-se à mistura dos agregados com o betume num misturador previamente aquecido à mesma temperatura. O processo de mistura ocorre durante 5 minutos aproximadamente.



Figura 3.16 – Misturador utilizado para a produção da mistura betuminosa (Laboratório NIDIn)

→ Determinação da Baridade Máxima Teórica (ρ_{mv})

A baridade máxima teórica da mistura determina-se seguindo o procedimento A – procedimento volumétrico descrito na EN 12697-5. O ensaio realiza-se sobre uma amostra da mistura betuminosa solta, previamente preparada de acordo com a EN 12697-27, numa quantidade de massa superior a 800g ($50 \times D_{max}$), (Figura 3.17).

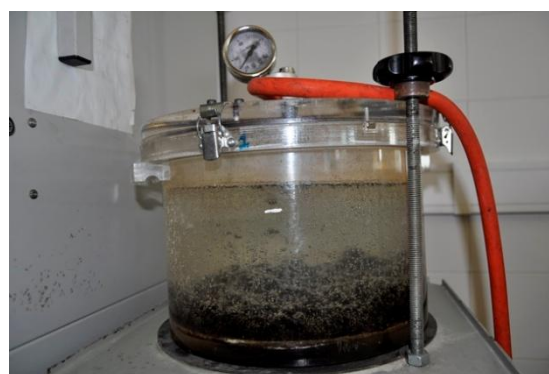


Figura 3.17 - Massa para ensaio da baridade máxima teórica (Laboratório NIDIn)

Começa-se por determinar a massa do picnómetro vazio (m_1) e com a amostra seca no seu interior (m_2). De seguida adiciona-se água ao conjunto até esta atingir aproximadamente 30mm de altura. Com aplicação de vácuo parcial a uma pressão residual de 4 kPa e com auxílio de vibração mecânica, o ar é retirado do interior do picnómetro, (Figura 3.18). Posteriormente, enche-se o picnómetro com água com o cuidado de não introduzir ar no seu interior, pesa-se novamente o conjunto (m_3) e regista-se a temperatura da água. Por ultimo lava-se o picnómetro, pesa-se o mesmo cheio de água (m_4) e faz-se novamente o registo da temperatura da água.



a)



b)

Figura 3.18 – a) Saída do ar da mistura betuminosa por auxílio de sistema de vácuo e vibração, b) Pormenor da saída do ar do interior do picnómetro (Laboratório NIDIn)

O volume do picnómetro é determinado através da equação (3.6), presente no Anexo C da respectiva norma e a baridade máxima teórica obtém-se da equação ((3.7). Os valores obtidos pela equação (3.7) são comparados aos valores de referencia obtidos através da equação (3.8).

$$V_p = \frac{m_4 - m_1}{\rho_w} \quad (3.6)$$

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 \times V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}} \quad (3.7)$$

Nas equações anteriores, ρ_{mv} corresponde à baridade máxima teórica (kg/m^3), V_p é o volume do picnómetro (m^3), m_1 é massa do picnómetro vazio (g), m_2 a massa do picnómetro com a amostra seca (g), m_3 é a massa do picnómetro com amostra e água (g) e m_4 diz respeito à massa do picnómetro cheio de água (g), V_p é o volume do picnómetro (m^3) e ρ_w é a densidade da água à temperatura de teste (kg/m^3).

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\frac{p_a}{\rho_a} + \frac{p_b}{\rho_b}} \quad (3.8)$$

Em que ρ_{mc} é a baridade máxima da mistura calculada (kg/m^3), p_a corresponde à percentagem de agregado na mistura; p_b é a percentagem de betume na mistura, ρ_a e ρ_b são respectivamente a densidade dos agregados e do betume.

→ Baridade dos Provetes Compactados (ρ_b)

A determinação da baridade dos provetes compactados² realiza-se segundo a NP EN 12697-6, através do procedimento C – Proвете selado. De acordo com este, pesa-se a massa seca de cada provete (m_1), os quais são depois cuidadosamente envolvidos numa película de *parafilm* (material selante) e determinado o seu peso (m_2), Figura 3.19. Finalmente introduzem-se os provetes em água e é anotado o seu peso imerso (m_3). Aquando da última pesagem é registada a temperatura da água, para que seja determinada a sua massa volúmica. Segundo esta metodologia o valor da baridade é obtido pela equação (3.9).

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}} \quad (3.9)$$

² Processo de compactação dos provetes cilíndricos é descrito no subcapítulo 3.3.2

Onde ρ_{bsea} é a baridade do provete selado (kg/m^3), m_1 , m_2 e m_3 são a massa do provete seco (g), massa do provete selado seco (g) e massa do provete selado em água (g), respectivamente, ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m^3) e ρ_{sm} é a massa volúmica do material selante à temperatura de ensaio (kg/m^3).



Figura 3.19 – Provetes selado (Laboratório NIDIn)

Uma vez que o método anterior pode conduzir a uma subestimação da grandeza estimada, os valores obtidos pelo procedimento C, foram comparados aos do procedimento D – Geométrico. A baridade dos provetes por este método é obtida através da equação (3.10), onde $\rho_{b,dim}$ é a baridade do provete pelo método geométrico em (kg/m^3), m_1 é a massa do provete seco (g), h é a altura do provete (mm) e d é o diâmetro do provete (mm).

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad (3.10)$$

→ Características Relacionadas com os Vazios dos Provetes Betuminosos

De acordo com a EN 12697-8:2003, com os valores da baridade máxima teórica e baridade dos provetes compactados, podem calcular-se as restantes características volumétricas dos provetes, obtidas pelas equações (3.11) e (3.12).

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_b}{\rho_{mv}} \times 100 \quad (3.11)$$

$$VMA = V_m + \frac{B \times \rho_b}{\rho_B} \quad (3.12)$$

Em que V_m é a porosidade (%), VMA corresponde ao volume de vazios na mistura de agregado (%), ρ_{mv} corresponde à baridade máxima teórica (mg/m^3), ρ_b é a baridade dos provetes compactados (kg/m^3), ρ_B densidade do betume (kg/m^3) e B corresponde à percentagem de betume da mistura (%).

→ Características de Marshall

As características de Marshall são estimadas em conformidade com a norma NP EN 12697-34. O valor da estabilidade Marshall (S) corresponde à força máxima a que um provete resiste a 60°C. Esta força é aplicada por uma prensa, depois do provete ser colocado entre as duas meias canas de aço de um estabilômetro, e o conjunto colocado entre os pratos da prensa (Figura 3.20). A velocidade de aproximação dos pratos é (50 ± 2) mm/min. A deformação Marshall (F) corresponde ao encurtamento diametral do provete, ocorrido desde o início do ensaio até ao momento de rotura.

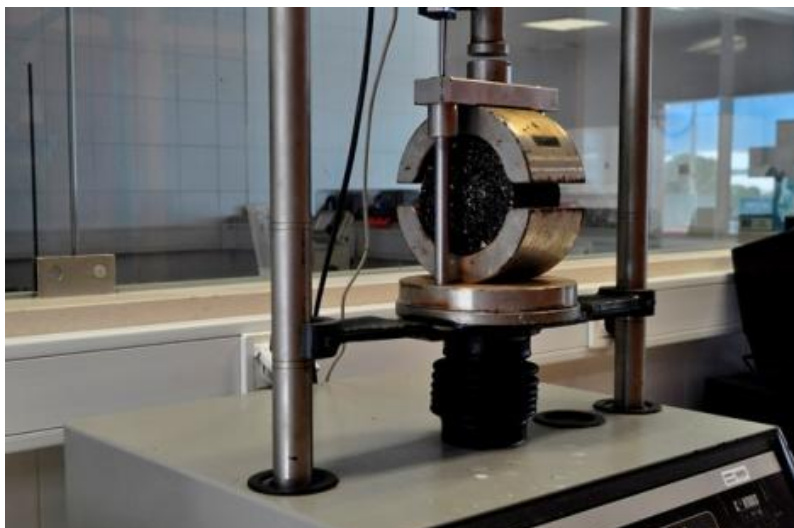


Figura 3.20 – Provette submetido ao ensaio de Marshall (Laboratório NIDIn)

→ Determinação da Percentagem Óptima de Betume

Para cada propriedade determinada sobre os provetes compactados, são calculados os valores médios dos três provetes fabricados com a mesma percentagem de betume. Essas médias são representadas num gráfico que relaciona a percentagem de betume com cada variável determinada.

Em cada gráfico obtido, traça-se uma curva que melhor se ajuste aos pontos representados. A percentagem óptima de betume corresponde à média da percentagem de betume correspondente à máxima estabilidade de Marshall (S), à máxima baridade dos provetes compactados (ρ_b) e ao valor médio dos limites da porosidade (V_m) definidos no Anexo Nacional da NP EN 13108-1:2008, para a mistura em causa, (Figura 3.21).

O valor obtido para a percentagem óptima de betume, deve corresponder a um valor de deformação de Marshall (F) e VMA dentro de certos limites impostos pelas especificações aplicáveis.

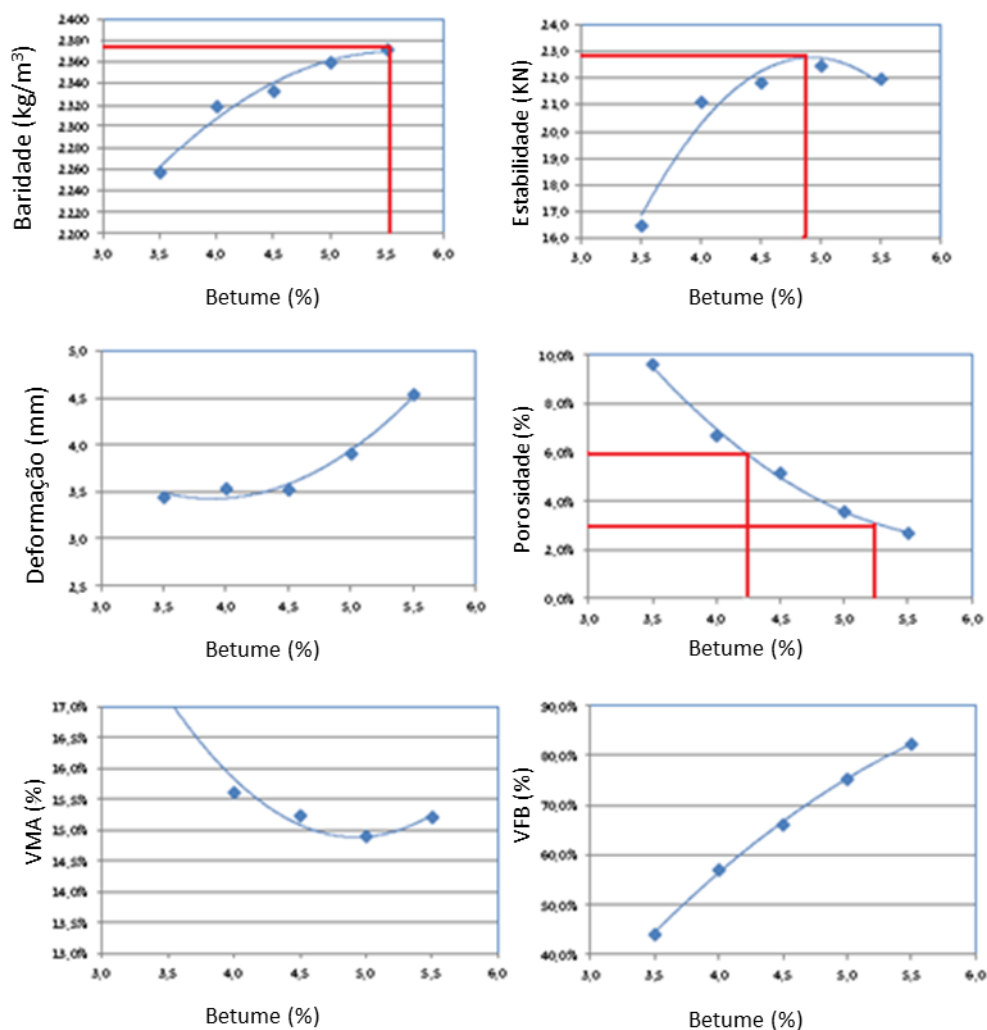


Figura 3.21 – Gráficos dos valores obtidos para cada percentagem de betume, relativos às variáveis estudadas no método de Marshall - Adaptado de Gardete et al., 2009

→ Controlo da Percentagem de Betume Adicionada à Mistura

Tendo em conta a quantidade de betume que fica nas paredes do misturador aquando o fabrico de uma mistura betuminosa, torna-se necessário controlar a percentagem real de betume constituinte da mistura final. A EN 12697-39:2004 define um procedimento de ignição do betume recorrendo a uma mufla com balança interna (Figura 3.22, a)), definido por método A.

De acordo com o método A, prepara-se uma quantidade de amostra dependente da máxima dimensão do agregado da mistura, e leva-se a mesma a uma estufa a $(110 \pm 2)^\circ\text{C}$ até massa constante, juntamente com o cesto de teste. Pesa-se o cesto vazio (W_t) e de seguida com a mistura no seu interior (W_s), ambas as pesagens são realizadas numa balança externa à mufla (Figura 3.22 b)). Posteriormente, coloca-se o conjunto no interior da mufla e dá-se início ao processo de ignição.

Quando a balança interna da mufla realizar três leituras consecutivas de massa constante, estamos em condições de terminar o ensaio. Retira-se o cesto do interior da mufla e deixa-se arrefecer à temperatura ambiente para registar a massa do conjunto após ignição (W_{t+a}), (Figura 3.22 c)).

A percentagem de betume constituinte da mistura betuminosa é calculada pelas equações que se seguem:

$$W_a = W_{t+a} - W_t \quad (3.13)$$

$$B = \frac{(W_s - W_a)}{W_s} \times 100 - CF \quad (3.14)$$

Em que, W_a corresponde massa do agregado remanescente após ignição (g), W_{t+a} é a massa do cesto com amostra após ensaio (g), W_t é a massa do cesto (g), B corresponde à percentagem de betume da mistura, W_s é o peso da amostra seca antes da ignição (g) e CF é o factor de correcção do equipamento.



a)



b)



c)

Figura 3.22 – a) Mufla utilizada no ensaio de ignição do betume; b) Amostra da mistura no interior do cesto de teste anteriormente ao ensaio; c) Amostra da mistura posteriormente ao ensaio (Laboratório NIDIn)

3.3.2. Compactação

3.3.2.1. Compactação de Provetes Cilíndricos

Após a realização da mistura betuminosa em concordância com a EN12697-35, esta é colocada na estufa para estabilização à temperatura de compactação. De seguida, deve estimar-se a quantidade de massa a colocar no molde metálico (Figura 3.23), recorrendo a um ensaio de teste, sabendo que a mesma depois de compactada deve resultar em provetes com um diâmetro que respeite o intervalo $(101,6 \pm 0,1)\text{mm}$ e altura $(63,5 \pm 2,5)\text{mm}$.

A quantidade de amostra estimada é então colocada no molde previamente aquecido à temperatura da estabilização da mistura e é sujeita a compactação por impacto em ambas as faces, de acordo com a NP EN 12697-30, sob 75 pancadas por indicação do Anexo Nacional da NP EN 13108-1:2008.

Os provetes depois de arrefecidos à temperatura ambiente, são desmoldados e medidos. Caso as dimensões dos provetes não cumpram os intervalos indicados anteriormente, estes devem ser excluídos e deve estimar-se novamente a quantidade de massa a compactar.



Figura 3.23 - Molde metálico para compactação de provetes cilíndricos (Laboratório NIDIn)

3.3.2.2. Compactação de Provetes Prismáticos

Anteriormente à realização da mistura, é imprescindível saber a quantidade de massa necessária para produzir um provete prismático com as dimensões pretendidas. Conhecendo as medidas do molde metálico, calcula-se o volume das lajes a obter. Por sua vez, esse valor é multiplicado pela baridade da mistura correspondente à percentagem ótima de betume, determinada no subcapítulo 3.3.1.3. Desta forma, é obtida a massa a compactar que conduz a um volume de vazios das lajes após compactação, próximo ao valor da porosidade correspondente à percentagem ótima de betume.

Conhecendo a quantidade de massa necessária, a mistura a compactar é realizada em laboratório de acordo com a EN12697-35 e estabilizada em estufa à temperatura de compactação, juntamente com o molde metálico. Após o período de estabilização o molde metálico é fixo num suporte de fixação, visível na Figura 3.24.

De seguida, a mistura é colocada no interior do molde e dá-se início ao processo de compactação com energia constante, realizado com um cilindro de rolos previamente arrefecido com água, seguindo as condições da EN 12697-33, Figura 3.25. A compactação dos provetes termina quando estes atingem a altura pretendida (Figura 3.26).



a)



b)

Figura 3.24 – a) Fixação do molde e rampa para cilindro de rolos; b) Preparação do molde metálico para introdução da mistura betuminosa (Laboratório NIDIn)



a)



b)

Figura 3.25 – a) Mistura no interior do molde pronta para processo de compactação; b) Preparação do cilindro de rolos para o processo de compactação



Figura 3.26 - Mistura após processo de compactação (Laboratório NIDIn)

3.3.2.3. Método de Ensaio da Compactabilidade

O ensaio da compactabilidade é executado de acordo com a EN 12697-10. Preparam-se e compactam-se provetes pelo compactador de impacto, de acordo com a NP EN 12697-30, a diferentes energias de compactação. Sobre ambas as faces de cada provete, aplicam-se 5, 15, 25, 35, 50 e 100 pancadas (Figura 3.27). Consoante o número de pancadas a realizar, é estimada a massa necessária para que as dimensões dos provetes respeitem os intervalos $(101,6 \pm 0,1)\text{mm}$ e $(63,5 \pm 2,5)\text{mm}$ de diâmetro e espessura respectivamente. Sobre cada provete é determinada a baridade dos provetes compactados segundo o método apresentado no subcapítulo 3.3.1.3.

A este método é aplicada a expressão exponencial (Equação (3.15)), que indica que o aumento da baridade obtido pela energia de compactação aplicada é proporcional ao potencial de compactação existente no material. O potencial de compactação é a diferença entre a baridade actual e a baridade máxima, obtida teoricamente para uma energia de compactação infinita.

$$\rho(s) = \rho_0 - (\rho_0 - \rho_\infty) \times e^{s/c} \quad (3.15)$$

Onde $\rho(s)$ é a baridade em função da energia de compactação aplicada (g/cm^3), S é a energia de compactação (N.m), ρ_0 e ρ_∞ dizem respeito à baridade inicial e máxima (g/cm^3), respectivamente, e C denomina-se por resistência à compactação (N.m). Os parâmetros ρ_0 e ρ_∞ e C , são determinados através do método dos mínimos quadrados.

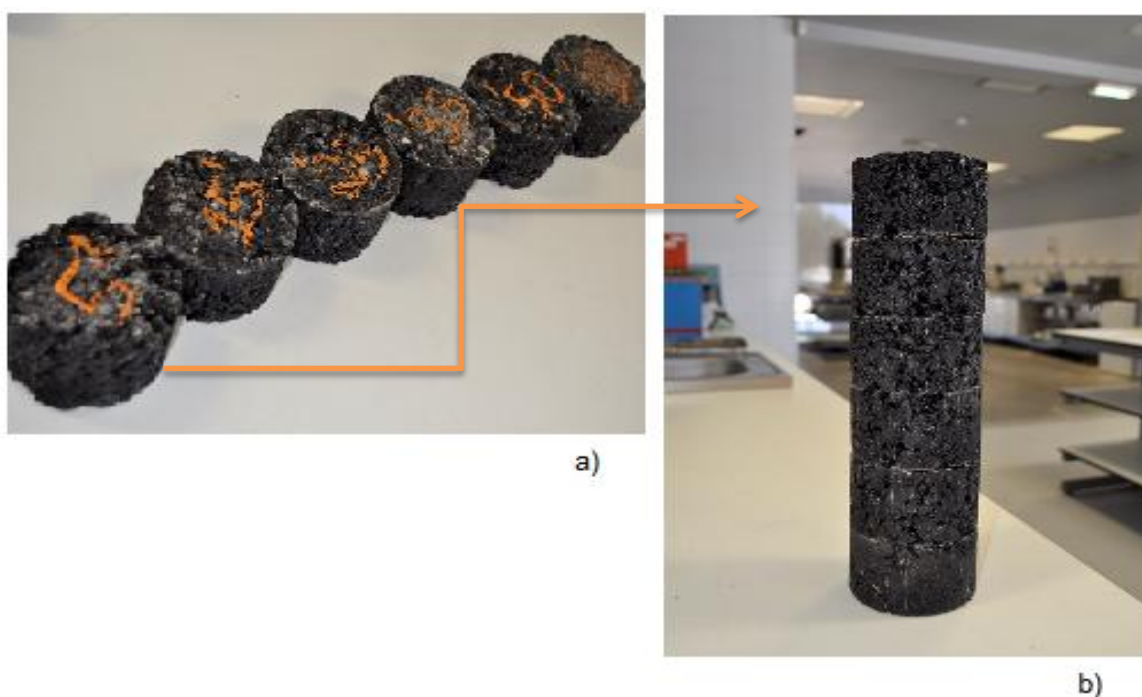


Figura 3.27 – a) Provetes compactados a diferentes energias de compactação; b) Provetes disposto verticalmente por incremento de energia de compactação (Laboratório NIDIn)

3.4. Caracterização do Desempenho das Misturas Betuminosas

3.4.1. Ensaio de Sensibilidade à Água

A determinação da sensibilidade à água realiza-se de acordo com a EN 12697-12, pelo método - A. Segundo esta, são preparados 6 provetes cilíndricos e determinam-se as respectivas baridades e dimensões, por forma a estabelecer dois subgrupos de ensaio, o seco e o húmido. Entre estes dois subgrupos as baridades não devem diferir mais de 15kg/m^3 e as espessuras mais de 5mm.

Depois da divisão feita, cada um dos subgrupos é devidamente acondicionado. Os provetes do subgrupo húmido são colocados dentro de água, sendo-lhes aplicado vácuo, através de pressão controlada de (67 ± 3) mbars, durante (30 ± 5) minutos, seguido de meia hora de repouso dentro de água (Figura 3.28). De seguida medem-se novamente as suas dimensões para garantir que não sofreram uma alteração de volume de mais de 2%.



Figura 3.28 – Aplicação de vácuo sobre o conjunto de provetes húmidos (Laboratório NIDIn)

Posto isto, o subgrupo húmido é colocado em banho-maria a 40°C durante 68 a 72h, enquanto o subgrupo seco se mantém durante todo este período sobre uma superfície plana, à temperatura ambiente. No final do tempo referido, ambos os subconjuntos são conduzidos a $(15\pm 5)^\circ\text{C}$, durante 2h. Por fim, todos os provetes são submetidos a um ensaio mecânico de tracção indirecta, de acordo com o estabelecido pela norma EN 12697-23 e é visualizada o tipo de rotura ocorrida (Figura 3.29). O quociente entre a resistência à tracção indirecta dos provetes imersos (ITS_w) e a resistência à tracção indirecta dos provetes acondicionados em condições menos severas (ITS_d), é o indicador da resistência à sensibilidade da água (ITSR), (Equação(3.16)).

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 (\%) \quad (3.16)$$



a)



b)

Figura 3.29 – a) Provetes submetidos a tracção indirecta; b) Provete com rotura combinada (Laboratório NIDIn)

3.4.2. Ensaio de Resistência à Deformação Permanente

O ensaio de pista é realizado em concordância com a EN 12697-22. Para tal, recorre-se a um equipamento de pequena dimensão, denominado na norma por *small size device*, por aplicação do procedimento B – condimento ao ar.



a)



b)

Figura 3.30 – a) Equipamento para ensaio de pista, modelo *small size device*; b) Interior do equipamento para ensaio de pista, modelo *small size device* (Laboratório NIDIn)

Segunda a norma aplicada, a utilização do equipamento *small size device* exige o ensaio de dois provetes prismáticos obtidos segundo o procedimento descrito no subcapítulo 3.3.2.2. As amostras são mantidas em repouso no interior dos moldes durante dois dias. Após o período de repouso, os provetes estão em condição de serem desmoldados e serrados por forma a se obterem duas lajes com dimensões 400x290x60mm (Figura 3.31).

A norma EN12967-22 estabelece para agregados com máxima dimensão entre 16mm e 22mm, uma espessura nominal de 60mm, sendo as restantes dimensões definidas de acordo com o equipamento.

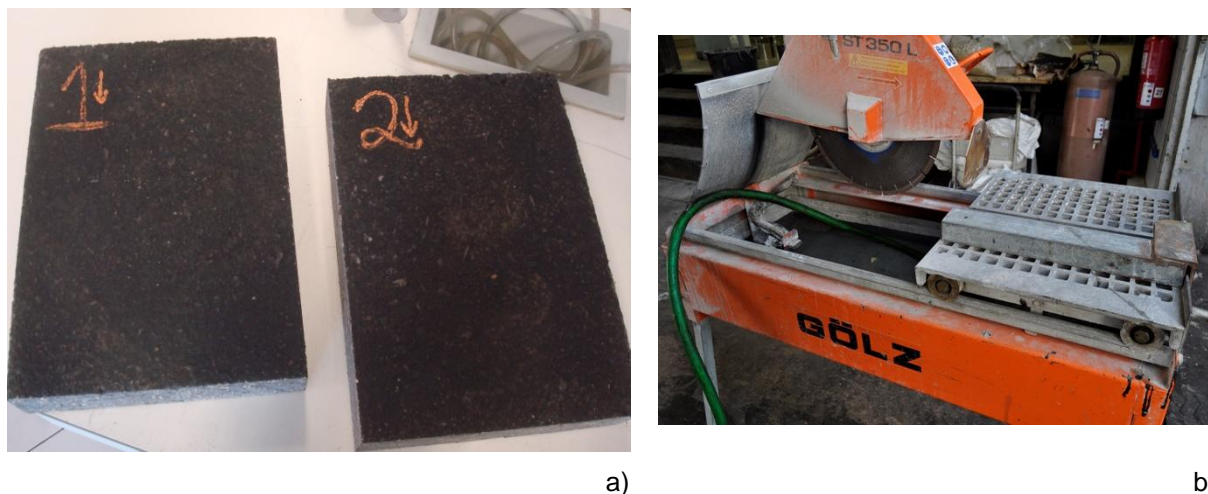


Figura 3.31 – a) Provete desmoldados e serrados; b) Equipamento de serragem (Laboratório NIDIn)

Determinaram-se as baridades das lajes em conformidade com a NP EN 12697-6, seguindo o procedimento B – provetes saturados com superfície seca (Equação(3.17)) e pelo procedimento D – geométrico (Equação (3.18)). De seguida, as lajes são armazenadas com a superfície de ensaio horizontal, a uma temperatura não superior a 25°C, até o decorrer do ensaio.

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (3.17)$$

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{h \times l \times w} \times 10^6 \quad (3.18)$$

Na equação (3.17), ρ_{bssd} é a baridade do provete saturado com superfície seca (kg/m^3), m_1 , m_2 e m_3 são a massa do provete seco (g), massa do provete em água (g) e massa do provete saturado com superfície seca (g) respectivamente. Na equação (3.18), $\rho_{b,dim}$ é a baridade do provete pelo método geométrico (kg/m^3), h é a altura do provete (mm), l o comprimento do provete (mm) e w é a largura do provete (mm).

Antes do decorrer do ensaio, o provete é fixo ao suporte de ensaio e condicionado ao ar, à temperatura de ensaio indicada na norma EN 13108-20, 60°C, durante um período de 6h, no interior do equipamento (Figura 3.32). Após o período de condicionamento, dá-se início ao ensaio.

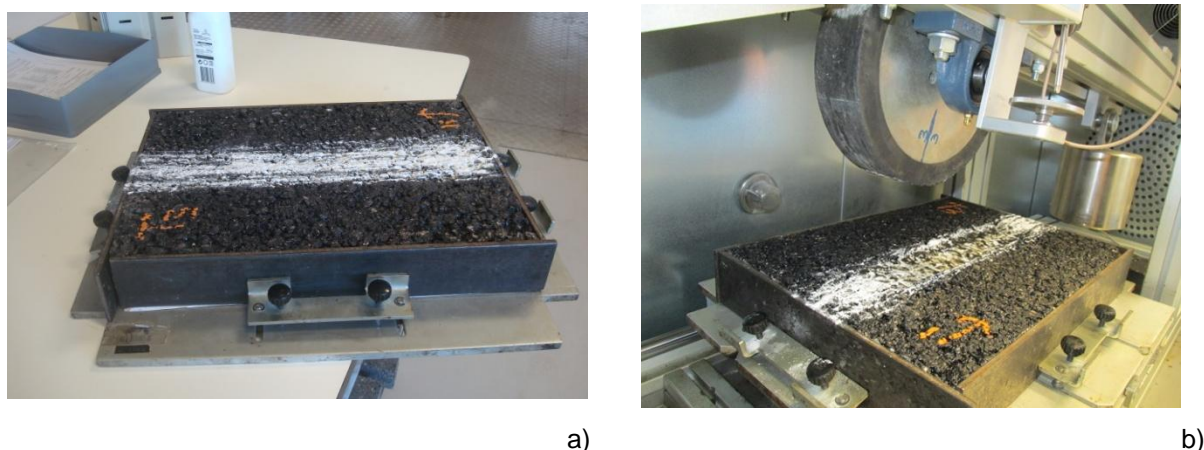


Figura 3.32 – a) Fixação do provete ao suporte; b) Conjunto fixo no equipamento de ensaio (Laboratório NIDIn)

O procedimento do ensaio consiste na aplicação de 10 000 ciclos de carga, induzidos pela passagem sucessiva de uma roda sobre o provete. O ensaio termina após este número de ciclos ter sido atingido ou quando se atinge uma profundidade de rodeira de 20 mm.

No caso de amostras condicionadas em ar, os principais resultados obtidos no ensaio são a taxa de deformação medida no ensaio de pista ao ar – *Wheel Tracking Slope in air* (WTS_{AIR}), dado pela equação (3.19), a percentagem da profundidade média de rodeira dos dois provetes ensaiados – *Mean Proportional Rut Depth in air* (PRD_{AIR}) e a média da profundidade de rodeira atingida no fim do ensaio – (RD_{AIR}), (Figura 3.33).

$$WTS_{air} = \frac{(d_{10\,000} - d_{5\,000})}{5} \quad (3.19)$$

Em que $d_{10\,000}$ e $d_{5\,000}$ correspondem à profundidade da rodeira após 10 000 ciclos e 5 000 ciclos, respectivamente.

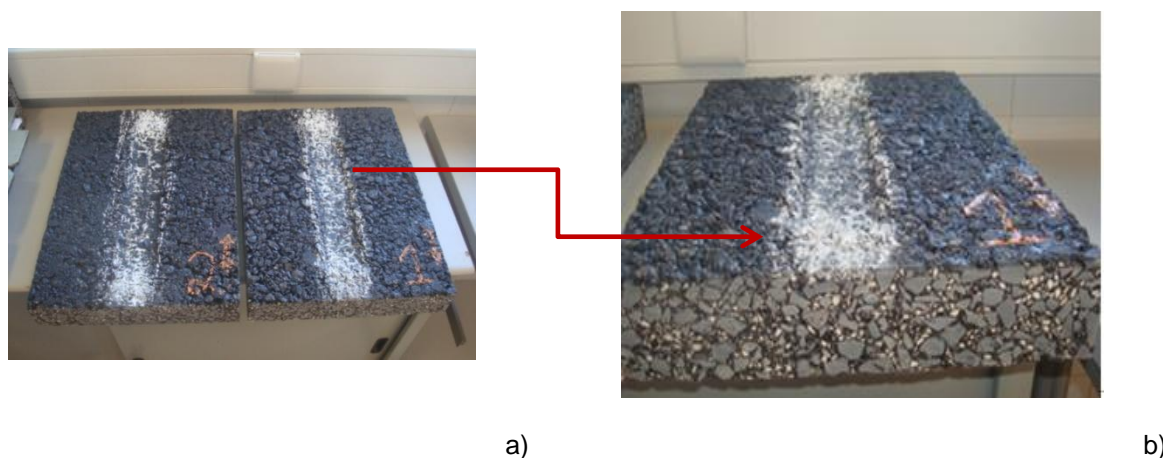


Figura 3.33 – a) Provetes após realização do ensaio; b) Pormenor da rodeira (Laboratório NIDIn)

3.4.3. Ensaio de Resistência à Fadiga e Rigidez

Os ensaios realizaram-se em dois locais distintos, no Laboratório do Núcleo de Investigação Desenvolvimento e Inovação (NIDIn), pertencente à empresa Probigalp Ligantes Betuminosos S.A e no Laboratório de Vias de Comunicação e Transporte pertencente ao Instituto Superior Técnico (IST). Ambos os equipamentos submetem os provetes a uma flexão em quatro pontos, embora um equipamento seja constituído por um sistema hidráulico (Figura 3.34 e Figura 3.35) e outro por um sistema de ar comprimido (Figura 3.36 e Figura 3.37).



Figura 3.34 – Equipamento de flexão em 4 pontos com sistema hidráulico no interior da câmara climática (Laboratório NIDIn)



Figura 3.35 – Pormenor do equipamento de flexão em 4 pontos (Laboratório NIDIn)



Figura 3.36 - Equipamento de flexão em 4 pontos com sistema de ar comprimido (Laboratório do IST)



Figura 3.37 – Sistema de ar comprimido utilizado no ensaio de flexão em 4 pontos (Laboratório IST)

Neste tipo de equipamento, o carregamento pode ser aplicado em tensão controlada ou em extensão controlada. Para o primeiro ensaio, a carga ou a amplitude de tensão, permanece constante durante o ensaio, com verificação do aumento da deformação (Figura 3.38 a)). No carregamento sob extensão controlada, a deformação é mantida constante com diminuição da força aplicada e da rigidez ao longo do ensaio, como pode ser observado na Figura 3.38 b, (Pais & Palha, 2010 e Pinto & Presuslee, 2001 citado em Montanari, 2007).

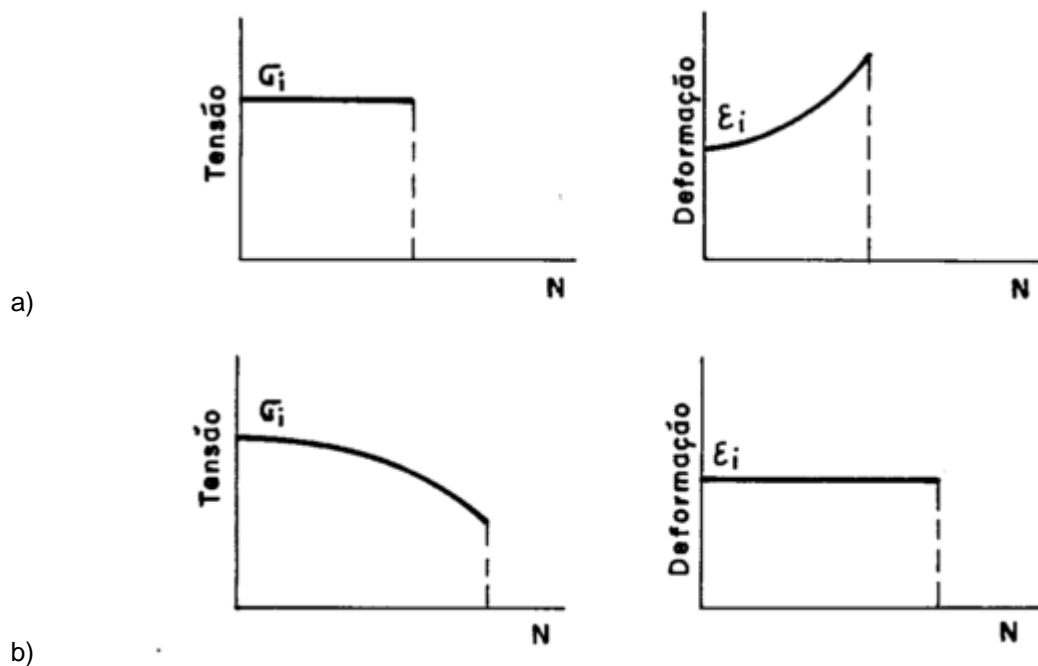


Figura 3.38 – Representação esquemática dos tipos de carregamento - Pinto, 1991

O equipamento de ensaio faz a aplicação de um carregamento cíclico através de dois apoios internos do provete, verticalmente e perpendicularmente ao eixo longitudinal da amostra. Os dois apoios localizados nos extremos da viga, impedem o seu deslocamento vertical. Desta forma o provete é materializado numa viga simplesmente apoiada em quatro pontos, com livre rotação e translação (Dias, 2009), como é esquematizado na Figura 3.39.

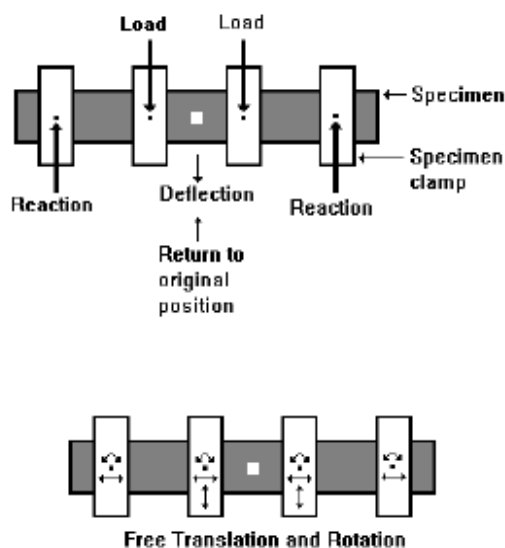


Figura 3.39 - Esquema da realização de ensaios de flexão em 4 pontos - Pais & Palha, 2010.

Para efeito dos ensaios de resistência à fadiga e rigidez, são realizados provetes prismáticos segundo o procedimento descrito no subcapítulo 3.3.2.2.. Os provetes são mantidos nos moldes durante dois dias, período após o qual, são desmoldados e serrados em vigas com as dimensões 400x60x60mm, estabelecidas na EN 12967-26 respeitante ao ensaio de rigidez e na EN 12967-24 do ensaio de fadiga, (Figura 3.40).

Após serragem, a amostra de ensaio deve secar até massa constante ao ar, a uma humidade relativa inferior a 80% e a uma temperatura entre 15°C e 20°C. Estas devem ser armazenadas totalmente apoiadas num local plano e limpo até o decorrer do ensaio, que não deve ocorrer antes de 2 a 8 semanas depois da data de corte.

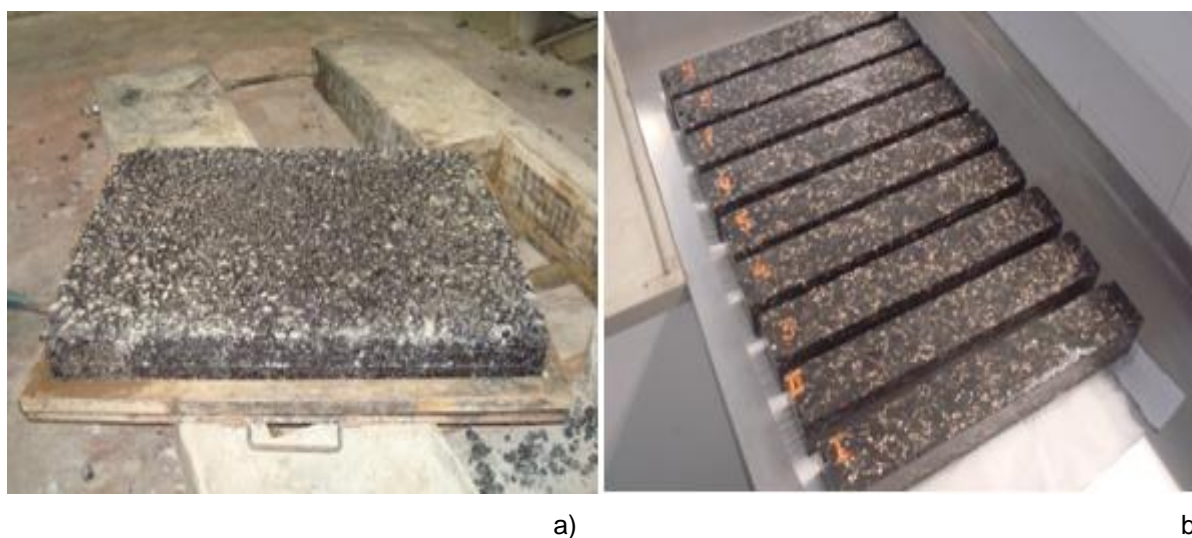


Figura 3.40 – a) Laje para ensaio de resistência à fadiga; b) Provette após serragem (Laboratório NIDIn)

Para as vigas a ensaiar determina-se a baridade aparente recorrendo ao método geométrico descrito na norma NP EN 12697-6:2003+A1 2010, por aplicação da equação (3.18). O método referido pode conduzir a uma subestimação da baridade dos provetes ou a uma sobrestimação da porosidade, pois os vazios da textura da superfície são considerados como parte integrante dos vazios internos do provete. No entanto opta-se por este método por ser de cálculo rápido e simples, e pelo facto do erro de cálculo ser reduzido, uma vez que os provetes são serrados em todas as faces, eliminando os vazios da superfície que levam à subestimação do valor da baridade aparente.

Antes do início do ensaio, o provete a ensaiar é colocado na câmara climática do equipamento, sendo levado à temperatura de ensaio seleccionada, 20°C, durante um período de 1h a 6h, conforme estabelecido nas normas em vigor. Após o tempo de estabilização, a viga é então colocada entre os elementos de fixação, e dá-se início ao ensaio.

Módulo de Rigidez

A determinação do módulo de rigidez ocorre consoante o descrito na EN 12697-26, para uma extensão controlada, aplicando um carregamento sinusoidal correspondente a uma deformação específica de tracção na base do provete de 50µm/m.

Os ensaios foram conduzidos em ordem crescente de frequências, tendo-se aplicado os valores 0.1, 0.2, 1, 5, 10, 20, 50 Hz e novamente 0.1 Hz, à temperatura de 20°C.

Para cada frequência de carregamento, a norma estabelece 45 a 100 repetições de carga, correspondendo este intervalo à primeira fase da evolução da rigidez, no qual é possível determinar o módulo de rigidez inicial (Figura 3.41). Neste trabalho são aplicadas 100 repetições de carga, respeitando assim o intervalo preconizado na norma em vigor.

No final do ensaio devem-se registar os valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase, para que se possa representar graficamente a evolução de ambas as variáveis com as frequências de ensaio.

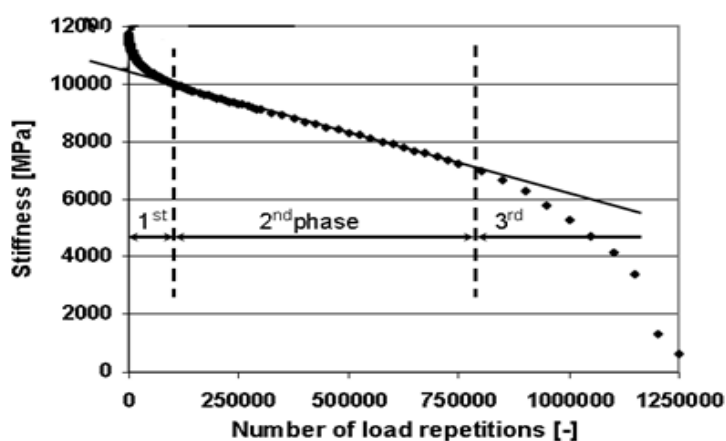


Figura 3.41 – Definição do módulo de rigidez inicial - Jacobs & Sluer, 2009

Fadiga

A avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas é efectuada com base na EN 12697-24, por aplicação de um carregamento em extensão controlada, a uma temperatura de 20°C.

Nos ensaios de fadiga, a rotura não implica necessariamente o total fendilhamento do provete. Nesses casos, deve considerar-se a ocorrência de rotura quando a mistura atingir valores residuais para as suas características mecânicas, nomeadamente o módulo de rigidez. A evolução deste pode ser distinto em três fases, inicial, estado estacionário e ruptura como é representado na Figura 3.41. O módulo de rigidez inicial é determinado na primeira fase para a 100ª carga aplicada, enquanto a rotura se encontra na última fase (misturas com betume convencional) ou na fase estacionária (misturas com PMB).

Desta forma, nos ensaios de extensão controlada, a rotura não é visível, pelo que se convencionou que a mistura atingiu a rotura quando o seu módulo de rigidez inicial é reduzido em 50%, (Pais & Palha, 2010 e Loureiro, 2003).

O ensaio realiza-se a uma frequência de carregamento de 10Hz, por ser o valor de ensaio habitualmente encontrado nas referências bibliográficas, em 3 níveis de deformação específica, 350 $\mu\text{m/m}$, 275 $\mu\text{m/m}$ e 200 $\mu\text{m/m}$, previamente seleccionados de forma a permitirem que a rotura se dê para um número de ciclos correspondente ao intervalo 10^4 e 2×10^6 .

Os resultados dos ensaios de fadiga são expressos em termos de lei de fadiga, de acordo com a equação (3.20), podendo ser observados através de um gráfico que relaciona a vida à fadiga com o nível de extensão aplicado, de acordo com a Figura 3.42.

$$N = a \times \varepsilon^{-b} \quad (3.20)$$

Em que, N é a resistência à fadiga da mistura betuminosa, ε é a extensão de tracção, a e b são coeficientes determinados experimentalmente.

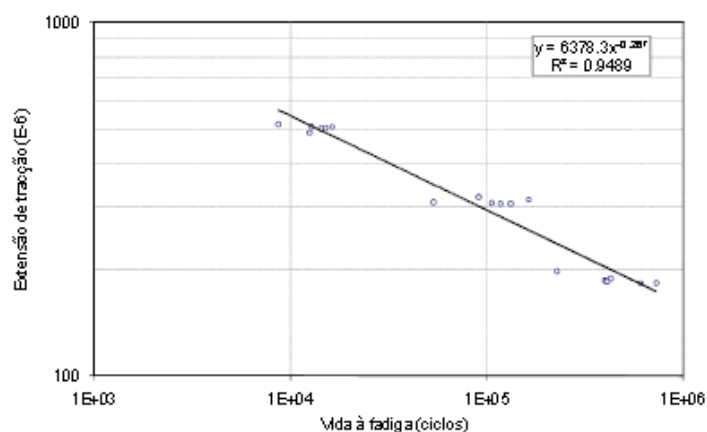


Figura 3.42 - Resultados dos ensaios de fadiga expressos em termos de lei de fadiga - Pais & Palha, 2010

Para além das leis de fadiga obtidas, a avaliação da resistência à fadiga é ainda complementada através da determinação de duas variáveis, sendo elas, ε_6 (extensão de tracção necessária para provocar a ruína por fadiga ao fim de 1×10^6 de ciclos), N_{100} (resistência à fadiga para uma extensão de tracção de 100×10^{-6}) (Dias, 2009 e Pais et al., 2008).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Caracterização dos Materiais Constituintes

4.1.1. Caracterização do Ligante Betuminoso

→ Avaliação do desempenho do ligante

Os resultados dos ensaios realizados sobre o PMB 45/80-65 estão apresentados no Quadro 4.1, juntamente com as normas respectivas a cada ensaio e as especificações a respeitar.

Quadro 4.1 – Resultados /Requisitos do betume PMB 45/80-65

Ensaios		Ref. Normativas	Valores normativos	Valores obtidos
Penetração a 25°C [0,1mm]		NP EN 1426:2010	45-80	51
Temperatura de Amolecimento [°C]		NP EN 1427:2010	≥65	72,8
Penetração Retida [%]			≥60	88
RTFOT	Aumento Temp Amolecimento [°C]	NP EN 12607-1:2010	≤10	-2,8
	Variação em massa [%]		≤1	-0,02
Recuperação Elástica a 25°C [%]		EN 13398:2010	≥70	97
Temperatura Fragilidade de Frass [°C]		EN 12593:2007	≤-15	-15
Temperatura de Inflamação [°C]		EN ISSO 2592	≥235	310

De acordo com a EN 14023-2005, os ensaios indicados permitem a completa caracterização do betume. Como se pode verificar, todos os valores obtidos cumprem os valores normativos. O relatório de ensaio do betume em estudo está presente no anexo A.

→ Viscosidade Dinâmica do Ligante

A Figura 4.1 representa a variação dos valores de viscosidade obtidos com a taxa de corte para a temperatura de 135°C, sendo esta a temperatura de controlo definida pela norma do produto de betumes modificados. A curva representada indica a diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de corte, característica do comportamento reológico dos betumes modificados.

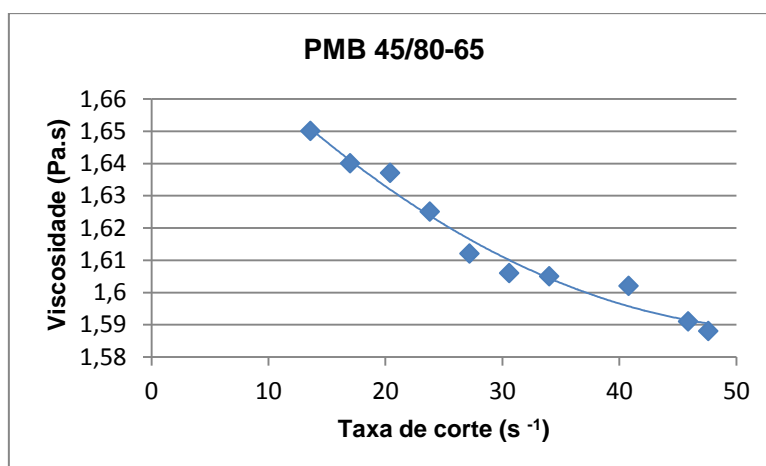


Figura 4.1 – Representação gráfica da viscosidade em função da taxa de corte para uma temperatura de 135°C

4.1.2. Caracterização dos Agregados

De acordo com o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (Estradas de Portugal. S.A. 2012), a composição granulométrica de cada mistura betuminosa deve conter, no mínimo, três fracções granulométricas distintas. Desta forma, seleccionaram-se quatro tipos de agregados com dimensões distintas (Figura 4.2 e Figura 4.3). A origem de cada agregado, natureza e fracções granulométricas, estão indicadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Identificação dos Agregados

Agregado	Pedreira	Natureza	Fracção Granulométrica (mm)
Fíler Comercial	Eurocálcio - Fátima	Calcário	<0,063
Pó de Pedra	Secil Britas – Alenquer	Calcário	0/6
Brita 8/12,5	Lena Agregados – Rio Maior	Basalto	8/12,5
Brita 10/16	Alves Ribeiro - Vialonga	Basalto	10/16,0

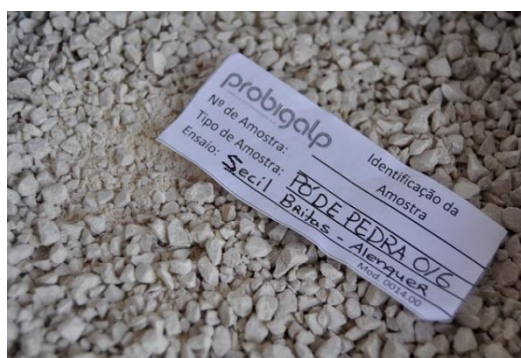


Figura 4.2 – Identificação dos agregados: fíler comercial e pó de pedra



Figura 4.3 - Identificação dos agregados brita 8/12,5 e 10/16

A Figura 4.4 apresenta as curvas granulometrias de cada agregado (Anexo B), enquanto os valores das massa volúmicas estão presentes no Quadro 4.3. As restantes propriedades exigidas pela NP EN 13043 (requisitos geométricos, físicos e químicos), quando aplicáveis, são testadas e declaradas pelo produtor dos agregados nas fichas técnicas do produto incluídas no anexo C.

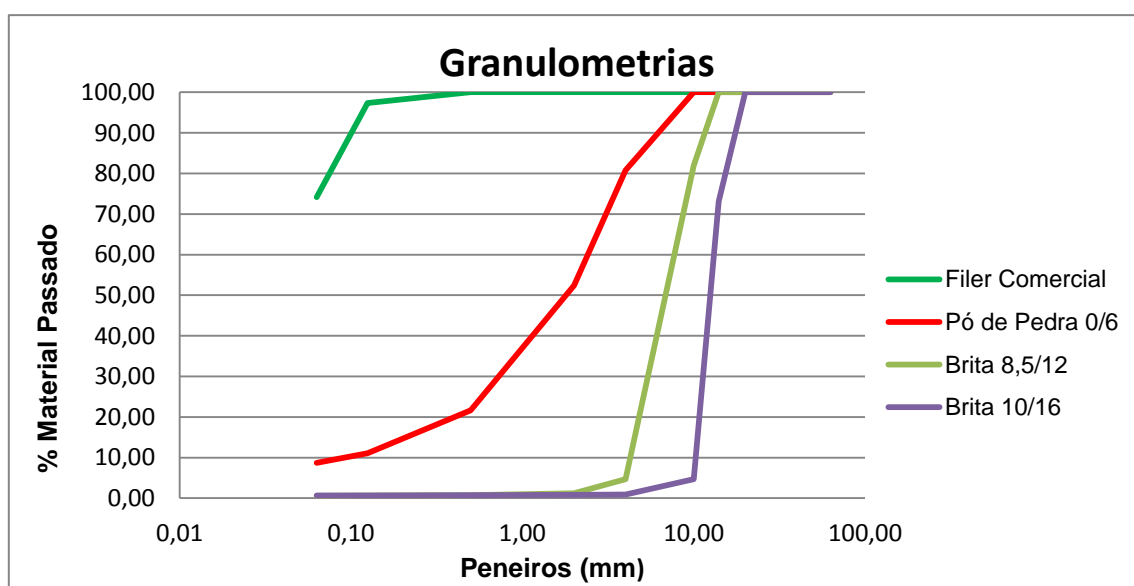


Figura 4.4 – Granulometrias dos agregados utilizados na formulação da mistura betuminosa

Quadro 4.3 – Massas volúmicas dos agregados

Agregado	Massas Volúmicas (Mg/m ³)			Absorção de água (%)
	Material impermeável das partículas	Partículas secas em estufa	Partículas saturadas com superfície seca	
Filer Comercial	2,71	-	-	-
Pó Calcário	2,60	2,54	2,57	1,1
Brita 8/12,5	3,01	2,96	2,98	0,58
Brita 10/16	3,00	2,99	3,00	0,13

As curvas granulométricas representadas na Figura 4.4 cumprem os intervalos estabelecidos nas fichas técnicas dos produtos. Por outro lado as massas volúmicas e os valores de absorção de água, presentes no Quadro 4.3, apresentam uma ligeira diferença dos valores apresentados pelos produtores. As diferenças de valores encontradas podem estar relacionadas com o facto do lote testado não ser o mesmo da altura da recolha dos agregados.

4.2. Produção das Misturas Betuminosas

4.2.1. Fabrico

4.2.1.1. Temperaturas de Mistura e Compactação

As temperaturas recomendadas pelos produtores, para os betumes modificados, são 170°C e 160°C para os processos de mistura e compactação respectivamente, como tem sido referido ao longo do presente texto (Anexo D).

Para os restantes métodos (Superpave e HSRV-E), o cálculo das temperaturas de mistura e compactação baseiam-se nos valores de viscosidade e taxas de corte determinados para as temperaturas consideradas (130°C, 135°C, 140°C, 150°C, 160°C, 165°C, 170°C, 180°C e 190°C). Os valores obtidos estão presentes na Tabela E 1 do anexo E.

Dos valores obtidos, seleccionaram-se 4 a 5 valores de viscosidade e taxa de corte respectiva para cada temperatura. O critério de selecção está relacionado com os pontos que permitem um melhor ajustamento gráfico. Os valores considerados, são o conjunto de dados de entrada (*input*) no algoritmo *Matlab* (valores a sombreado presentes na Tabela E 1). Os dados de saída (*output*) são os parâmetros da equação do modelo de Cross (η_0 , η_∞ , K e m), apresentados na Tabela E 2, do anexo E.

→ Superpave:

Com os parâmetros de Cross, é possível definir o modelo de Cross adequado a cada temperatura. Assumindo o valor de taxa de corte $6,8 \text{ s}^{-1}$, obtêm-se os valores apresentados no Quadro F 1 do anexo F e que estão representados graficamente na Figura 4.5. Com recurso a uma linha de tendência é possível estimar uma temperatura de mistura de 193°C associada ao intervalo $0,17 \pm 0,02 \text{ Pa.s}$ e uma temperatura de compactação de 180°C para viscosidades de $0,28 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$.

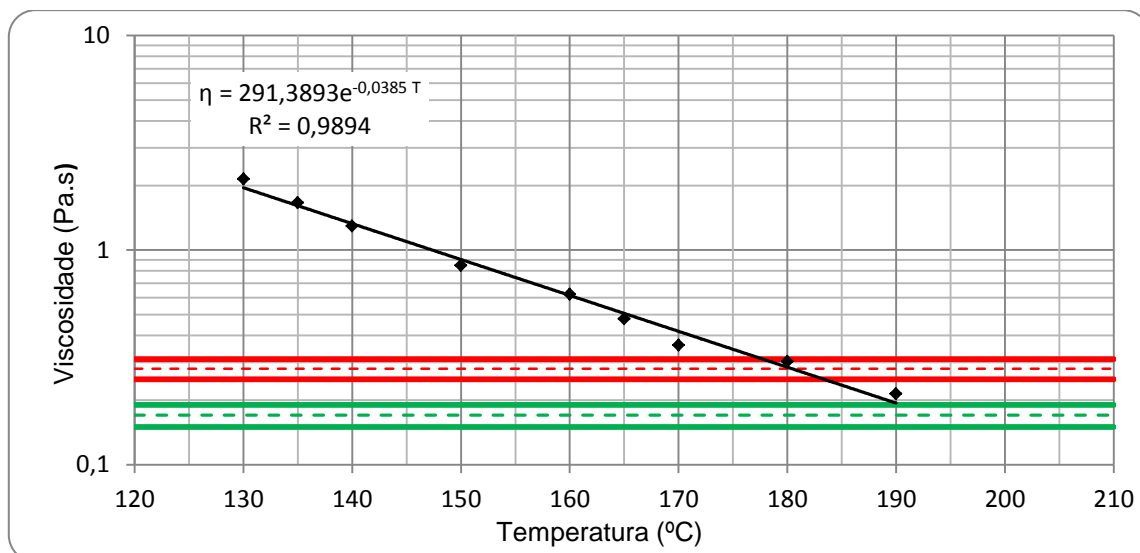


Figura 4.5 – Cálculo das temperaturas de mistura e compactação pelo método Superpave

→ **HSRV – E:**

Repetindo o procedimento anterior para uma taxa de corte de 500 s^{-1} , surgem os valores do Quadro F 2. Quando representados graficamente permitem estimar uma temperatura de mistura de 180°C associada ao intervalo $0,275 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$ e uma temperatura de compactação de 162°C para viscosidades de $0,550 \pm 0,06 \text{ Pa.s}$.

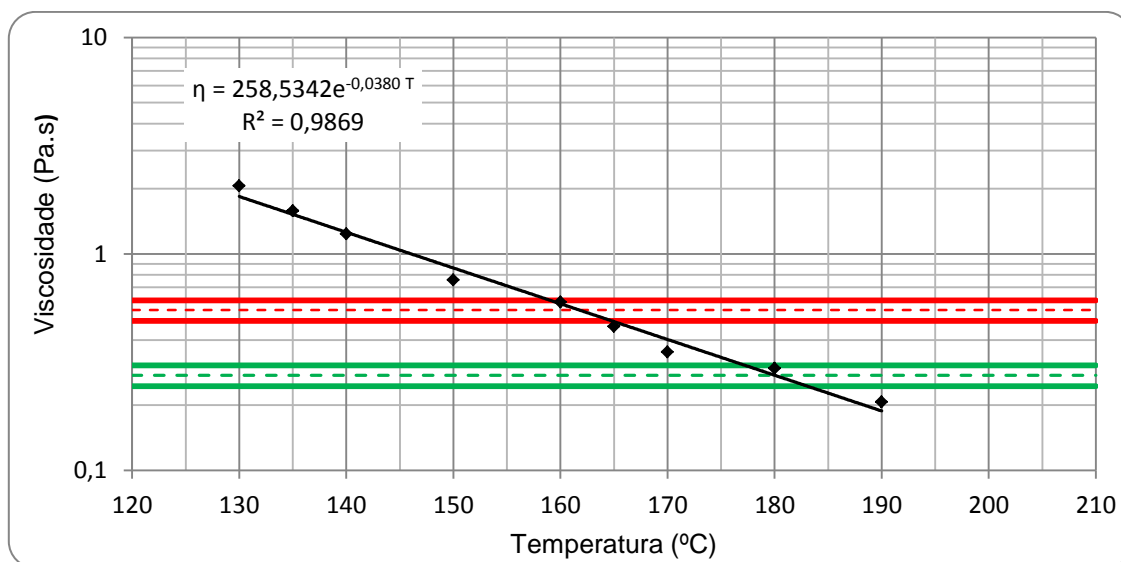


Figura 4.6 – Cálculo das temperaturas de mistura e compactação pelo método HSRV-E

O Quadro 4.4 apresenta as temperaturas consideradas no estudo associadas ao método de cálculo respectivo. Apresenta ainda, uma designação distinta para cada mistura betuminosa, consoante as temperaturas de mistura e compactação a que são submetidas, de forma a facilitar a compreensão do texto que se segue.

Quadro 4.4 – Designação da mistura betuminosa consoante as temperaturas de mistura e compactação

Método	Temperatura Mistura (°C)	Temperatura Compactação (°C)	Designação
Indicado pelo Produtor	160-170	150-160	MB 170/160
Superpave	193±3	180±3	MB 193/180
HSRV-E	180±3	162±3	MB 180/162

Avaliando o valor do parâmetro R^2 das duas linhas de tendência representadas, consegue-se perceber que estas têm um bom ajustamento aos pontos do gráfico, assim sendo, o cálculo das temperaturas apresenta à partida uma pequena margem de erro.

Quando se comparam as temperaturas recomendadas pelos produtores com as temperaturas obtidas pelo método Superpave, constata-se que as últimas apresentam valores bastantes superiores, com uma diferença de cerca de 20°C, tanto para a temperatura de mistura, como para a temperatura de compactação.

Relativamente aos resultados obtidos pelo método HSRV-E, verifica-se que a temperatura de compactação é semelhante à recomendada pelos produtores do ligante betuminoso, apresentando uma disparidade de 10°C na temperatura de mistura.

Pode constatar-se ainda, que as temperaturas de mistura e compactação recomendadas pelos produtores, apresentam entre elas uma diferença de 10°C, situação que se verifica também para as temperaturas obtidas pelo método Superpave, no entanto, quando calculadas pelo método HSRV-E estas apresentam uma diferença de cerca de 20°C.

4.2.1.2. Formulação da Mistura Betuminosa

→ Curva Granulométrica da Mistura

Realizaram-se vários estudos de formulação, até que todos os valores obtidos respeitassem os limites estabelecidos no caderno de encargos das Estradas de Portugal (Estradas de Portugal. S.A., 2012). Os estudos realizados apresentam-se em resumo no Anexo G.

O estudo de formulação final, definiu as proporções de agregado indicadas no Quadro 4.5, com as quais, se obtém uma mistura de agregados que respeita o fuso granulométrico estabelecido anteriormente. Os valores ponderados que caracterizam a mistura e os valores dos limites que estabelecem o fuso a respeitar estão presentes no anexo H, Quadro H 1, e representados graficamente na Figura 4.7.

Quadro 4.5 – Percentagem de cada agregado a incorporar na mistura betuminosa

Agregado	Fíler Comercial	Pó de Pedra 0/6	Brita 8,5/12	Brita 10/16
Percentagem utilizada na mistura betuminosa	5,00	36,00	32,00	27,00

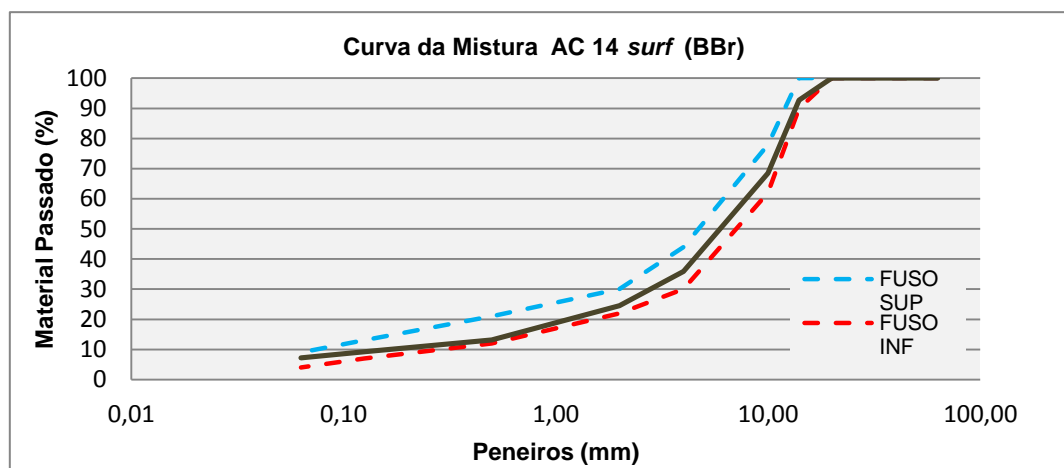


Figura 4.7 – Curva granulométrica da mistura AC 14 surf (BBr) e fuso adoptado

Determinação da Percentagem Óptima de Betume

A percentagem óptima de betume foi estimada para uma mistura betuminosa produzida com as temperaturas recomendadas pelos produtores do ligante betuminoso. Os resultados dos ensaios realizados durante o método de formulação sobre a MB 170/160, para cada percentagem de betume estudada, estão anunciados no Quadro 4.6 e representados num conjunto de gráficos numerados de Figura 4.8 a Figura 4.13.

Quadro 4.6 – Características dos provetes realizados para efeito de ensaio de Marshall

Parâmetro	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)	2663	2642	2599	2576	2546
Baridade Máxima Teórica Calculada (kg/m ³)*	2647	2626	2604	2584	2563
Baridade dos provetes compactados (Selado) (kg/m ³)	2493	2513	2501	2493	2481
Baridade dos provetes compactados (Geométrico) (kg/m ³) *	2502	2514	2505	2490	2451
Porosidade dos Provetes (%)	6,38	4,88	3,76	3,24	2,55
VMA (%)	16,07	15,86	15,90	16,55	17,00
Estabilidade Marshall (N)	15582,5	14355,5	12982,9	11583,9	9720,1
Deformação Marshall (mm)	3,3	4,8	4,5	6,9	10,5

* Apenas como valor indicativo

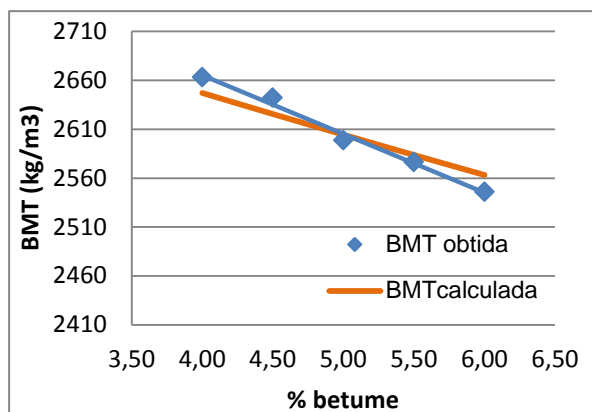


Figura 4.8 – Representação gráfica baridade máxima teórica

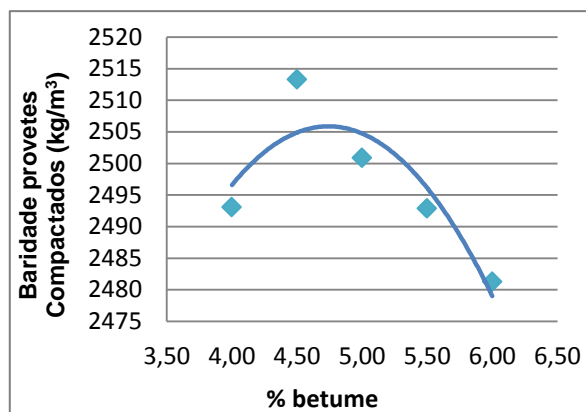


Figura 4.9 – Representação gráfica baridade dos provetes compactados

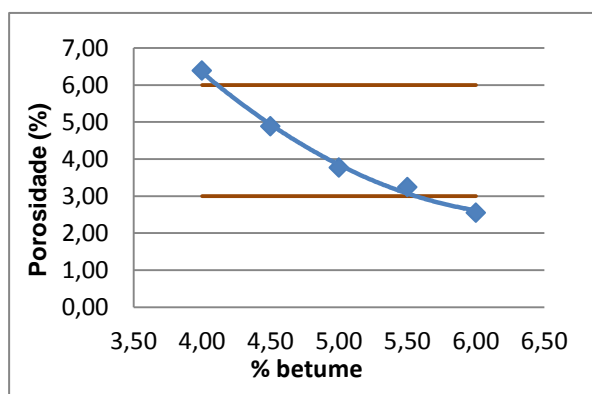


Figura 4.10 - Representação gráfica da porosidade

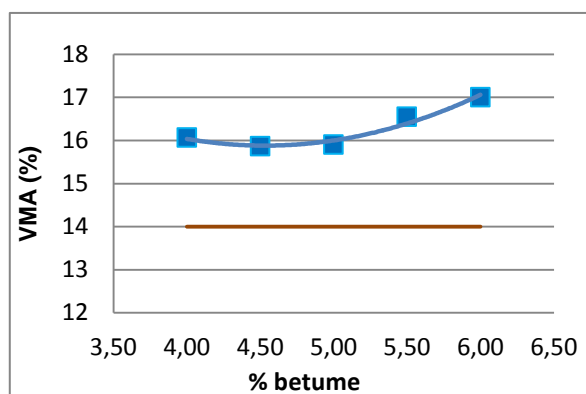


Figura 4.11 – Representação gráfica do VMA

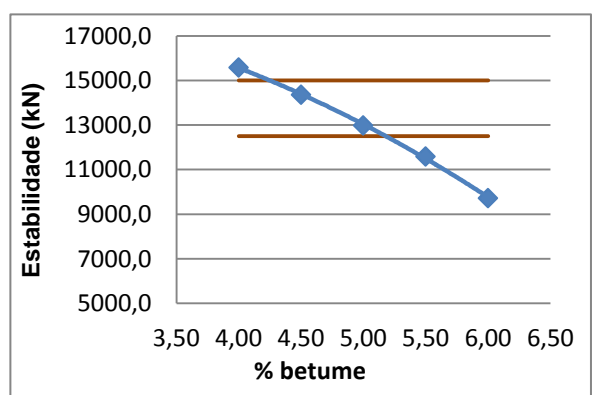


Figura 4.12 – Representação gráfica da estabilidade de Marshall

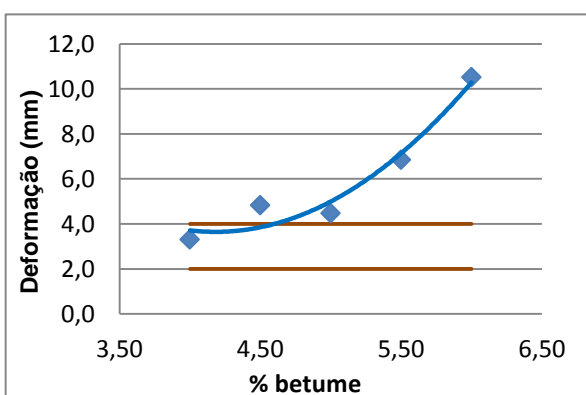


Figura 4.13 – Representação gráfica da deformação Marshall

Os valores da baridade máxima teórica calculada aparecem no Quadro 4.6 apenas como pontos de referencia aos valores obtidos, não devendo entre eles existir uma diferença significativa de valores. Apresentam-se também os resultados da baridade dos provetes compactados pelo método geométrico, apesar de não serem considerados nos cálculos, estes dados permitiram concluir que ao invés do método hidrostático, o mais indicado a realizar nos provetes em estudo seria o método selado, pela aproximação dos valores obtidos.

Através dos gráficos obtidos é determinada a percentagem óptima de betume de 4,6%, respeitando o valor mínimo estabelecido no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (Estradas de Portugal. S.A., 2012), 4,0%, para o tipo de misturas em estudo. Para percentagem referida, a mistura betuminosa assume os seguintes valores:

Quadro 4.7 – Parâmetros obtidos para a percentagem óptima da mistura betuminosa

Parâmetros	Valores
Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)	2629
Baridade dos Provetes Compactados (kg/m ³)	2506
Porosidade (%)	4,7
VMA (%)	15,9
Estabilidade de Marshall (kN)	14131
Deformação de Marshall (mm)	4,0

Por observação das figuras anteriores, verifica-se que as representações gráficas assumem o desenvolvimento esperado e todos os parâmetros cumprem os limites estabelecidos, à excepção da deformação de Marshall que exhibe valores superiores a 4mm. No entanto, se analisados os valores do quadro anterior, constata-se que os valores obtidos para a percentagem óptima de betume, cumprem os limites normativos

Todos os ensaios mencionados nos subcapítulos que se seguem, são realizados sobre provetes produzidos com a percentagem óptima de betume. O valor referido, 4,6%, será considerado válido para as misturas preparadas às restantes temperaturas, uma vez que os parâmetros de produção são os mesmos, nomeadamente, o mesmo tipo de betume, as mesmas fracções de agregado e a mesma curva granulométrica, sendo a única variável entre elas as temperaturas de fabrico e compactação.

4.2.2. Compactação

4.2.2.1. Compactabilidade

No Quadro 4.8, estão indicados os valores da resistência à compactação (C) de cada mistura betuminosa, enquanto o desenvolvimento da baridade e da porosidade dos provetes com o aumento da energia de compactação estão representados nas Figura 4.14 e Figura 4.15 respectivamente.

Quadro 4.8 – Valores de resistência à compactação (C)

Identificação	C
MB 170/160	29,16
MB193/180	22,47
MB 180/162	49,26

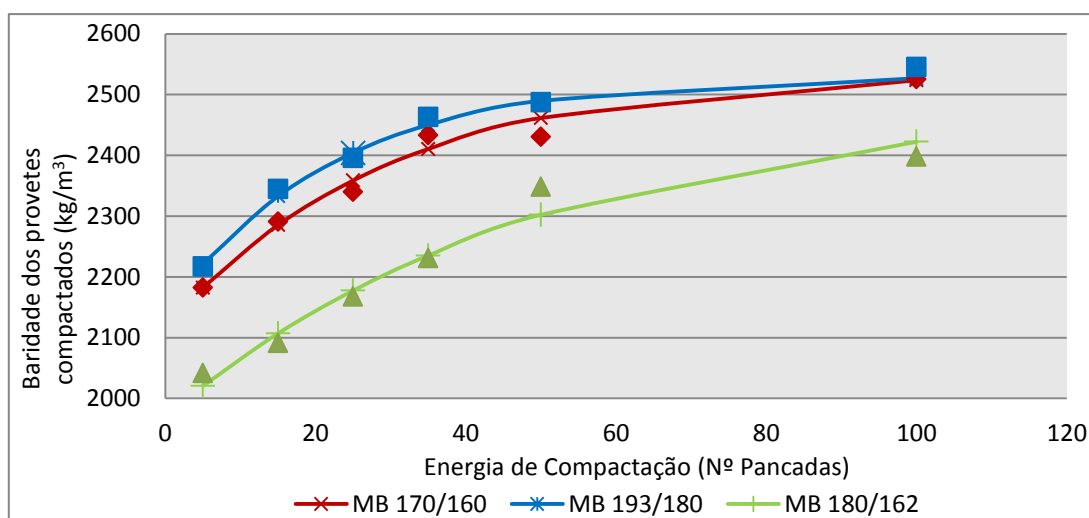


Figura 4.14 – Variação da baridade dos provetes compactados com o aumento da energia de compactação

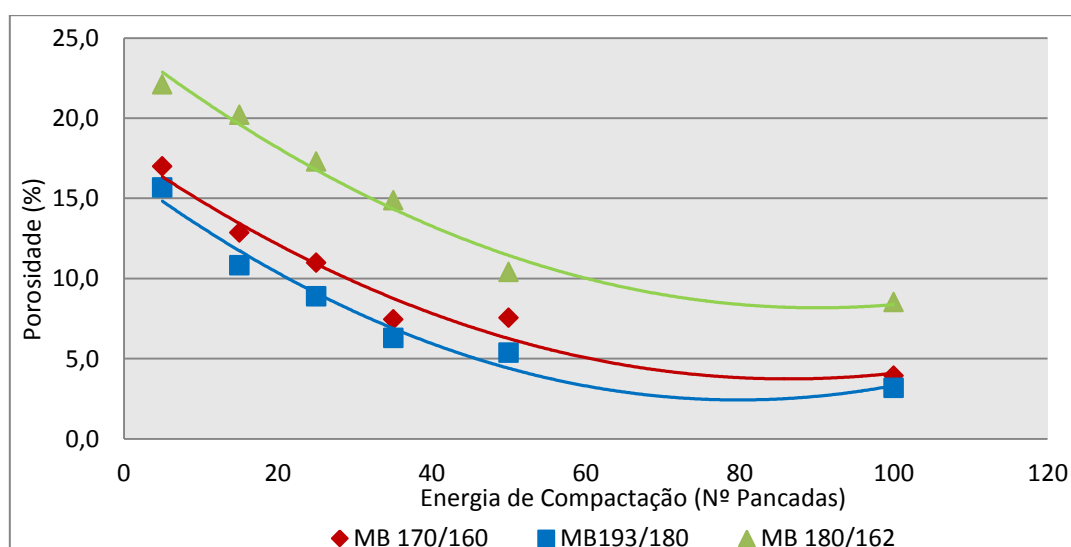


Figura 4.15 – Diminuição da porosidade dos provetes com o aumento da energia de compactação

Todos os provetes ensaiados apresentam dimensões dentro do intervalo $(101,6 \pm 0,1)$ mm de diâmetro e $(63,5 \pm 2,5)$ mm de altura, conforme especificado na norma NP EN 12697-30.

Analisando os resultados obtidos, pode constatar-se que a MB 170/160 e a MB 193/180 apresentam valores de resistência à compactação próximos, ao contrário da MB 180/162 que ostenta um valor bastante superior, o que significa que a última exige uma energia de compactação maior para atingir valores de baridade e porosidade idênticos às restantes misturas.

Este facto é evidente na Figura 4.14 e Figura 4.15, cujas representações gráficas são expectáveis atendendo aos valores presentes no Quadro 4.8. Como seria de esperar, para a mesma energia aplicada, as misturas com menor resistência à compactação apresentam baridades superiores e consequentemente porosidades inferiores, relativamente à mistura com parâmetro (C) superior.

Na figura que se segue são comparadas as rugosidades superficiais dos provetes compactados com as 3 misturas em estudo, às várias energias de compactação. Em primeiro lugar, é visível nas três misturas, a diminuição da porosidade com o aumento do número de pancadas aplicadas, por outro lado, verifica-se que a MB 193/180 apresenta uma menor rugosidade superficial, sendo a MB 180/162 a que a exibe uma superfície mais porosa, reforçando os valores analisados anteriormente.

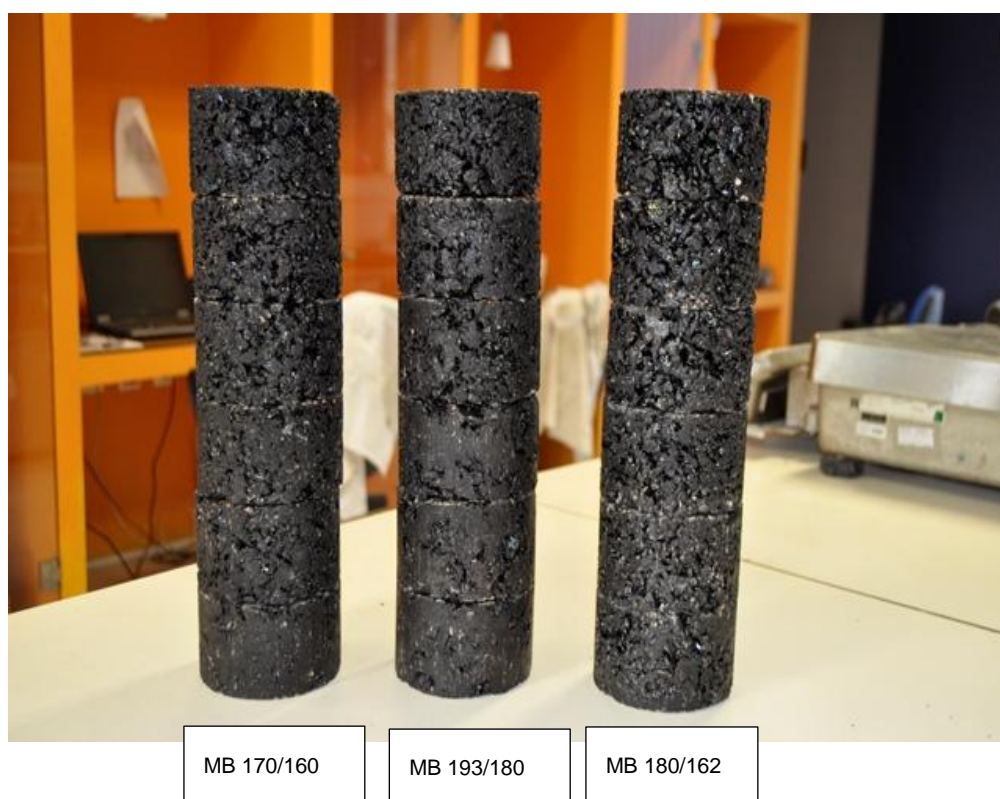


Figura 4.16 – Provetes dispostos verticalmente por aumento de energia de aplicação (Laboratório NIDIn)

A Figura 4.17 mostra a superfície interna dos provetes serrados, compactados a 5 e 100 pancadas, para as três misturas em estudo.

Para a mesma mistura, existe uma diferença notória entre os provetes compactados a 5 pancadas e a 100 pancadas, tanto em termos de porosidade interna como de rugosidade superficial, como não podia deixar de ser, os provetes com menor energia de compactação são mais porosos e apresentam uma superfície bastante mais irregular.

Por outro lado, para uma energia de 5 pancadas, é evidente a elevada porosidade interna dos provetes da MB 180/162 quando comparada com as porosidades dos restantes provetes. Esta análise é condescendente com os factores apresentados anteriormente.



Figura 4.17 – Provetes com 5 pancadas (esquerda) dispostos lateralmente aos provetes 100 pancadas (direita), (Laboratório NIDIn)

4.3. Caracterização do Desempenho das Misturas Betuminosas**4.3.1. Sensibilidade à Água**

O Quadro 4.9 apresenta as características volumétricas correspondentes aos provetes sujeitos ao ensaio de sensibilidade à água.

Quadro 4.9 - Características dos provetes sujeitos ao ensaio ITSR

Mistura Betuminosa	Características		
	Grandeza	Provetes secos	Provetes húmidos
MB 170/160	Altura (mm)	62,41	62,73
	Porosidade (%)	4,8	4,8
	Baridade média (kg/m ³)	2506	2505
MB 193/180	Altura (mm)	62,42	62,36
	Porosidade (%)	3,9	3,9
	Baridade média (kg/m ³)	2530	2529
MB 180/162	Altura (mm)	61,63	61,44
	Porosidade (%)	3,2	3,2
	Baridade média (kg/m ³)	2550	2550

Todos os provetes envolvidos no ensaio, apresentam dimensões dentro do intervalo ($101,6 \pm 0,1$) mm de diâmetro e ($63,5 \pm 2,5$) mm de altura, conforme especificado na norma NP EN 12697-30.

Pela análise do quadro anterior, verifica-se que os provetes da MB 170/160 e MB 193/180 apresentam uma altura semelhante e ligeiramente superior aos provetes produzidos com a MB 180/162, no entanto a porosidade destes varia de uma forma significativa. Tendo em conta que o intervalo de massa introduzida nos moldes aquando a compactação dos provetes é pouco amplo (1265g a 1275g), a variação do volume de vazios apresentada é antagónica aos resultados do ensaio de compactabilidade. A mistura MB 180/162 segundo o ensaio anterior é a mais resistente à compactação e no entanto é a que apresenta uma porosidade inferior neste ensaio. Este facto pode estar relacionado com a dificuldade de obtenção do peso imerso dos provetes, através do método selado, uma vez que a superfície dos mesmos apresentava uma rugosidade superficial elevada, rompendo a película de parafilm. Por esse motivo, a água entra nos poros do provete, adulterando o valor da baridade e consequentemente da porosidade. Este ponto de vista é reforçado pela discrepância dos valores obtidos para a pesagem mencionada relativamente às pesagens dos provetes das restantes misturas.

Por outro lado, a MB 170/160 é a que tem um volume de vazios mais próximo do valor correspondente à percentagem óptima (4,6%), enquanto as duas outras misturas apresentam valores inferiores ao óptimo. Em concordância com a norma EN 12697-12, a diferença de alturas dos provetes entre o subgrupo seco e o subgrupo húmido é inferior a 5 mm e a diferença das baridades inferior a 15kN/m³.

Produção de Misturas Betuminosas com Betume Modificado

No Quadro 4.10 estão presentes os resultados obtidos no ensaio de sensibilidade à água, sendo os valores de ITS_d e ITS_w , representados graficamente na Figura 4.18, para cada conjunto de temperaturas consideradas.

Quadro 4.10 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água

Mistura Betuminosa	Ensaio		
	Grandeza	Provetes secos	Provetes húmidos
MB 170/160	Força de rotura ITS média (kN)	24,4	21,7
	Tensão de rotura ITS média (kPa)	2449	2163
	Índice de Tracção Indirecta (%)	88	
MB 193/180	Força de rotura ITS média (kN)	27,3	25,7
	Tensão de rotura ITS média (kPa)	2735	2578
	Índice de Tracção Indirecta (%)	94	
MB 180/162	Força de rotura ITS média (kN)	25,8	22,4
	Tensão de rotura ITS média (kPa)	2624	2279
	Índice de Tracção Indirecta (%)	87	

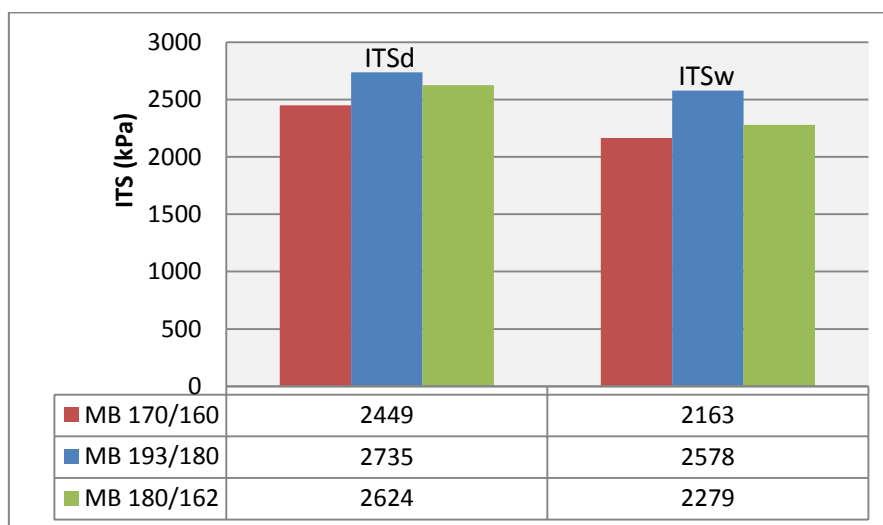


Figura 4.18 – Valores obtidos para ITS_d e ITS_w para os provetes preparadas a diferentes temperaturas

Pela análise dos resultados obtidos verifica-se que os provetes com menor porosidade não conduzem a um índice de tracção indirecta mais elevado. Aliás, não obstante à diferença do volume de vazios dos provetes das MB 180/162 e 170/160, são estas que apresentam índices de tracção indirecta mais próximos, apesar dos primeiros estarem supostamente mais compactados e por isso menos susceptíveis à água. Esta análise está em concordância com a justificação apresentada para a baixa porosidade apresentada pelos provetes da MB 180/162. Por outro lado, os provetes com porosidade semelhante à óptima não obtiveram um valor de resistência à água superior.

De qualquer forma, tendo em conta o valor de repetibilidade anunciado na EN 12697-12, 15%, pode afirmar-se que os resultados do ensaio das misturas em estudo não apresentam uma diferença significativa.

Uma vez que não está especificado um valor normativo para valores de ITSR, será tomado como referencia o valor de resistência conservada indicado no Caderno de Encargos da EP (Estradas de Portugal. S.A., 2012) para a mistura AC 14 *surf* (BBr), 80%. Assim sendo, verifica-se que os valores de ITSR obtidos são superiores ao valor de referencia e por esse motivo, pode constatar-se que as misturas em estudo apresentam uma boa resistência à água.

4.3.2. Resistência à Deformação Permanente

No Quadro 4.11 apresentam-se as características das lajes para efeito do ensaio de pista. Os resultados finais do ensaio estão presentes no Quadro 4.12, sendo o desenvolvimento da rodeira representado graficamente na Figura 4.19. O anexo J, contem os resultados obtidos para todos os ciclos de carga.

Quadro 4.11 – Características volumétricas médias dos provetes

Características Volumétricas			
Identificação da Laje	MB 170/160	MB 193/180	MB 180/162
Massa (g)	17514	17389	17525
Baridade (kg/m ³)	2479	2471	2471
Porosidade (%)	5,4	5,7	6,0

Pela análise dos valores do quadro anterior, observa-se que as misturas apresentam valores semelhantes de massa, baridade e porosidade. Este facto deve-se à quantidade de mistura introduzida no molde ser a mesma, independentemente das temperaturas utilizadas. Desta forma, mesmo que a mistura para determinada temperatura possa ser mais compactada, tal não acontece porque o cilindro ao ter uma dimensão superior à largura do molde, fica impossibilitado de atingir profundidades inferiores à altura do molde. Desta forma, o efeito das diferentes temperaturas utilizadas na produção das misturas betuminosas, assume maior relevância no ensaio, relativamente à porosidade ou à resistência de compactação.

Analisando ainda as características volumétricas das lajes, repara-se que estas têm porosidades acima do valor expectável, uma vez que a massa produzida corresponde à que levaria a uma porosidade de 4,6%, correspondente à porosidade da percentagem óptima de betume. Este facto pode estar relacionado com a perda de massa aquando a compactação das misturas.

Quadro 4.12 – Resultados médios dos 2 provetes do Ensaio de Pista

Valores do Ensaio de Pista			
Identificação da Laje	MB 170/160	MB 193/180	MB 180/162
WTS _{mAIR} (mm/10 ³ ciclos de carga)	0,260	0,169	0,207
PRD _{mAIR} (% 1E4 ciclos de carga)	7,7	7,2	7,7
RD _{mAIR} (mm 1E4 ciclos de carga)	4,7	4,4	4,7

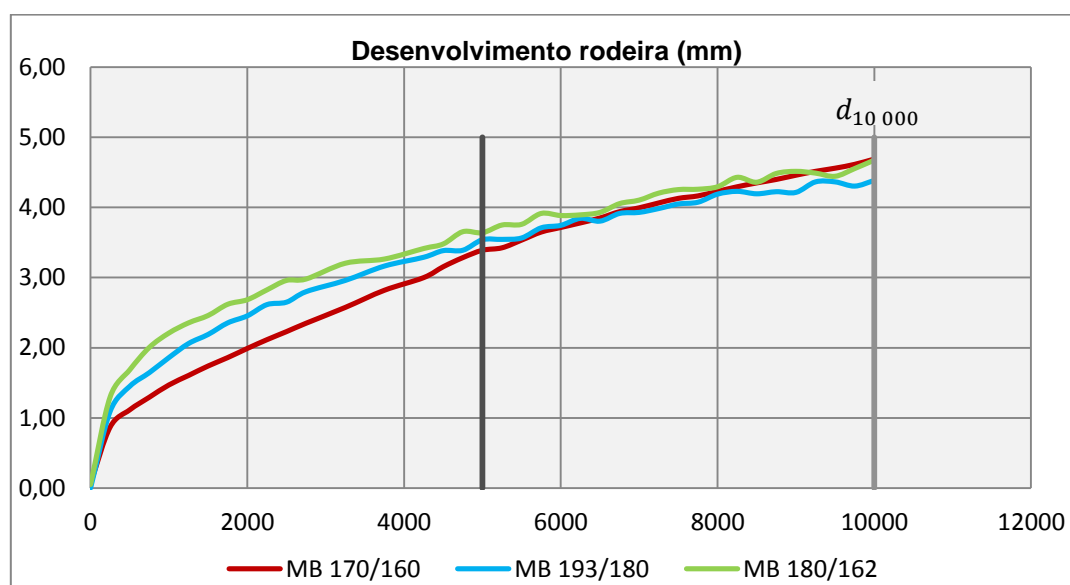


Figura 4.19 – Representação gráfica do desenvolvimento da rodeira (mm)

A análise da Figura 4.19, permite distinguir duas fases distintas de desenvolvimento da rodeira. Na primeira fase o acréscimo de deformação por carregamento é elevado, enquanto numa segunda fase, esse acréscimo ocorre de uma forma quase linear. A evolução da rodeira descrita anteriormente era a esperada, tendo em conta a bibliografia encontrada. Comparando a Figura 4.20, com a representação gráfica obtida nos ensaios realizados, são notórias as semelhanças das duas primeiras fases. A terceira fase identificada na referencia bibliográfica corresponde à ruptura do provete, obviamente inexistente nos resultados obtidos, uma vez que os ensaios realizados terminaram aos 10000 ciclos de carga, para os quais nenhum dos provetes atingiu a rotura.

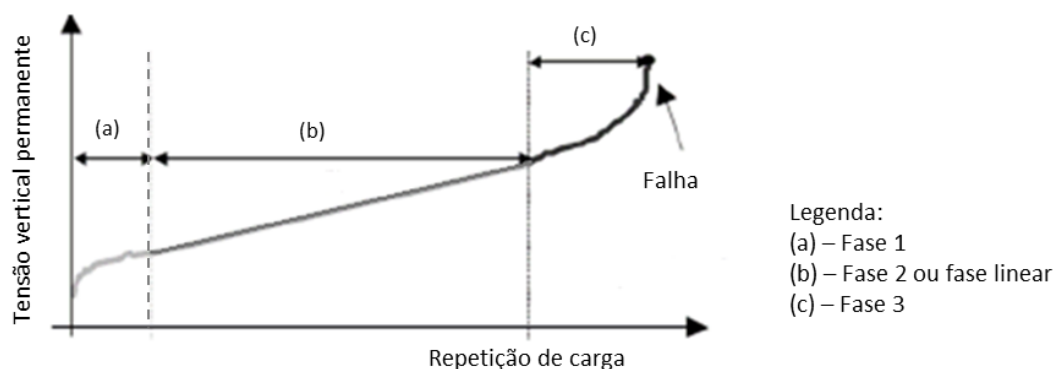


Figura 4.20 – Evolução da deformação permanente e misturas betuminosas – Gardete, 2006

De acordo com Gardete (2006), na primeira fase ocorre uma densificação da mistura devido à aplicação repetida de cargas. Este fenómeno aumenta a resistência à deformação permanente pois aumenta o contacto entre os agregados e processa-se até a mistura ter resistência suficiente para suportar as cargas sem sofrer mais redução de volume. Numa segunda fase, o acréscimo da deformação ocorre essencialmente devido a tensões de corte a volume constante, esta evolui de uma forma quase linear com o número de carregamentos.

A comparação de resultados entre os diferentes ensaios, presentes no Quadro 4.12, mostra existir uma boa correlação quando se comparam parâmetros similares. Aliás, verifica-se que a rodeira atingida no final do ensaio das MB 170/160 e 180/162 é exactamente a mesma e insignificativamente superior à rodeira da laje da MB 193/180.

4.3.3. Resistência à Fadiga e Rigidez

As características das vigas destinadas aos ensaios de fadiga e determinação do módulo de rigidez estão presentes no Quadro 4.13 e Quadro 4.14. Pela análise do mesmo, constata-se que existe grande variabilidade de valores para todas as características apresentadas, quer para as vigas produzidas à mesma temperaturas quer para vigas produzidas a temperaturas distintas. As massas variam entre 3841g a 3588,0g, as baridades encontram-se na gama de valores entre 2619kg/m³ e 2544kg/m³ e as porosidades variam entre 3,23% e 0,37%.

Repare-se que o provete com maior porosidade apresenta um valor consideravelmente inferior ao correspondente à percentagem óptima de betume. Este facto pode estar relacionado com a margem de massa incrementada à estimada através da baridade máxima teórica óptima, para colmatar possíveis perdas de massa.

A discrepância de valores apresentada para as vigas da mesma mistura, está possivelmente relacionada com a compactação diferencial do extremo para o centro do molde, que toma relevo neste ensaio, por se caracterizar cada viga individualmente contrariamente ao ensaio de deformação permanente, cuja caracterização é efetuada sobre a laje na integridade.

Quadro 4.13 – Características volumétricas das vigas para ensaio de resistência à fadiga e modulo de rigidez

Mistura	Provete	Massa (g)	Baridade (kg/m ³)	Porosidade (%)
MB 170/160	V1-T1	3755,0	2554,6	2,83
	V2-T1	3753,2	2550,3	3,00
	V3-T1	3721,7	2555,7	2,79
	V4-T1	3714,4	2563,6	2,49
	V5-T1	3759,1	2578,3	1,93
	V6-T1	3762,1	2577,3	1,97

Produção de Misturas Betuminosas com Betume Modificado

Quadro 4.14 - Características volumétricas das vigas para ensaio de resistência à fadiga e modulo de rigidez (Continuação)

Mistura	Provete	Massa (g)	Baridade (kg/m ³)	Porosidade (%)
MB 170/160	V7-T1	3766,8	2575,5	2,04
	V8-T1	3779,4	2569,7	2,25
	V9-T1	3727,5	2562,3	2,54
MB 193/180	V2-T2	3784,8	2594,9	1,30
	V3-T2	3710,8	2589,6	1,50
	V4-T2	3789,9	2586,0	1,64
	V6-T2	3841,0	2597,7	1,19
	V7-T2	3793,0	2599,0	1,14
	V8-T2	3742,0	2582,9	1,75
	V12-T2	3723,5	2573,8	2,10
	V13-T2	3743,5	2570,1	2,24
	V14-T2	3762,2	2584,4	1,70
	V16-T2	3737,6	2575,4	2,04
MB 180/160	V1-T3	3701,20	2574,5	2,07
	V2-T3	3704,70	2583,6	1,73
	V3-T3	3680,20	2584,5	1,69
	V4-T3	3675,00	2588,6	1,54
	V5-T3	3706,00	2581,9	1,79
	V6-T3	3609,10	2581,7	1,80
	V7-T3	3615,70	2577,6	1,96
	V8-T3	3628,90	2579,5	1,88
	V9-T3	3588,60	2562,7	2,52
	V11-T3	3787,30	2579,1	1,90
	V12-T3	3807,20	2586,2	1,63
	V13-T3	3806,10	2619,4	0,37
	V14-T3	3823,50	2589,8	1,49
	V15-T3	3827,60	2583,7	1,72
	V16-T3	3774,50	2559,9	2,63
	V17-T3	3727,90	2561,3	2,58
	V18-T3	3697,70	2544,0	3,23

Módulo de Rigidez

Os valores de módulo de rigidez e ângulo de fase estão representados graficamente nas Figura 4.21 e Figura 4.22 respectivamente, para a gama de frequências aplicadas.

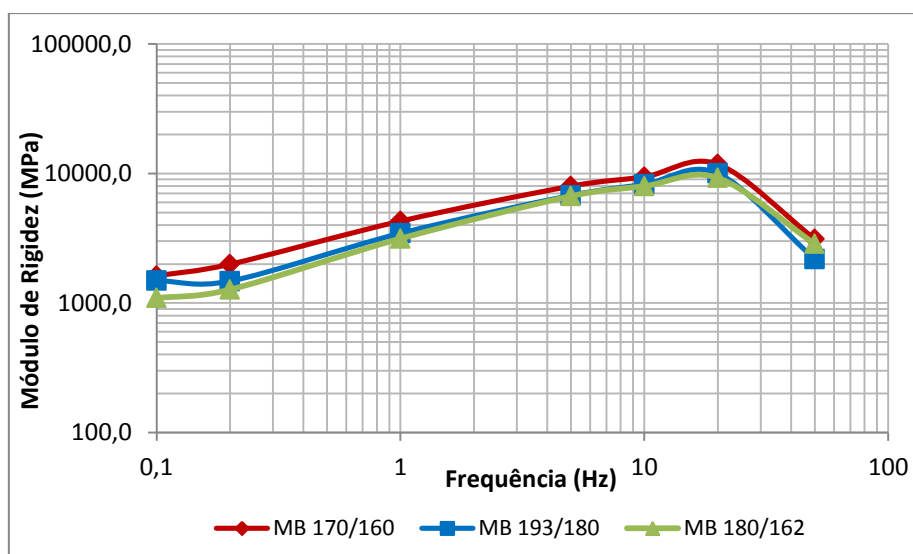


Figura 4.21 – Representação gráfica do módulo de rigidez para as misturas betuminosas em estudo

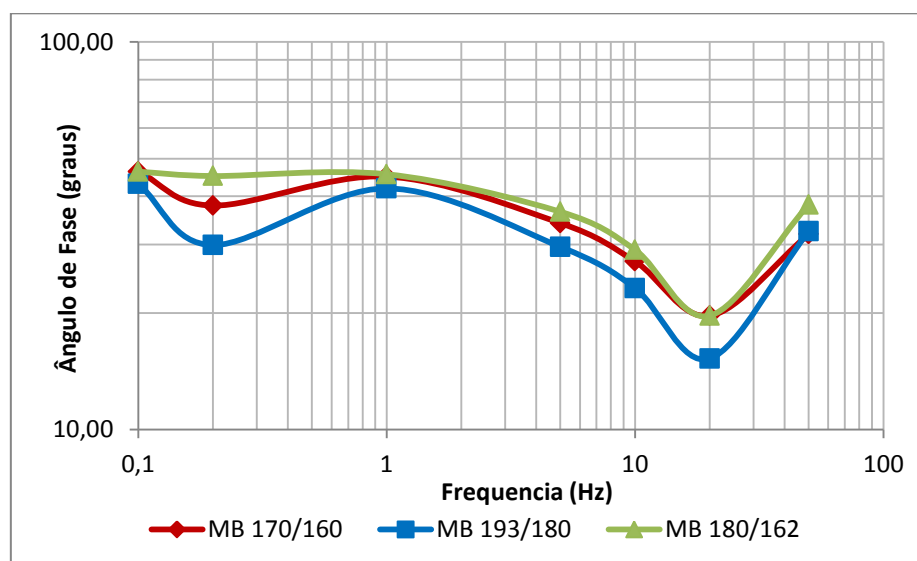


Figura 4.22 – Representação do ângulo de fase para as misturas betuminosas em estudo

Das figuras anteriores, podemos constatar que o módulo de rigidez aumenta e o ângulo de fase diminui com o aumento da frequência aplicada, com excepção dos valores obtidos para 0,2Hz e 50Hz. Uma vez que a situação se repete para todas as misturas betuminosas, pode-se considerar o facto do equipamento utilizado no ensaio não conseguir produzir o efeito desejado para as frequências em causa. Por esse motivo, optou-se por ignorar os valores correspondentes às frequências de 0,2 Hz e 50 Hz. As novas representações gráficas obtidas para o módulo de rigidez e ângulo de fase, podem ser observadas nas Figura 4.23 e Figura 4.24, respectivamente.

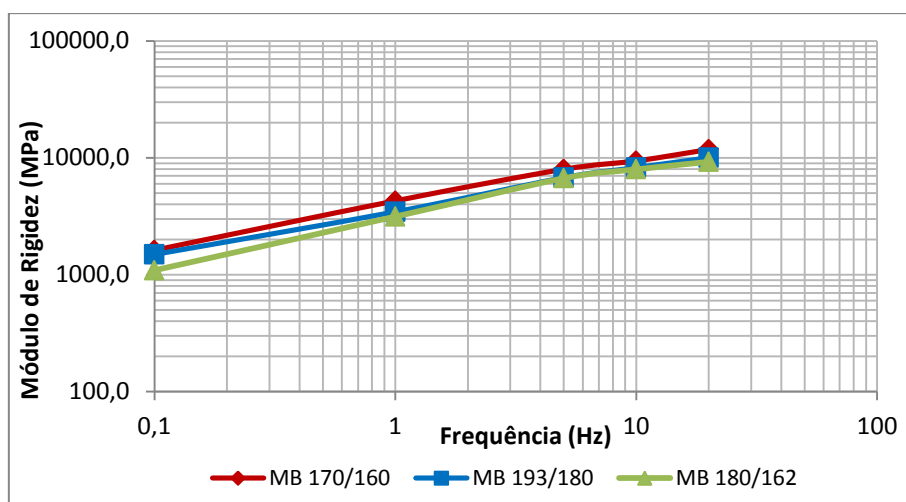


Figura 4.23 – Representação do módulo de rigidez para as misturas betuminosas em estudo ignorando os resultados para as frequências 0,2Hz e 50Hz

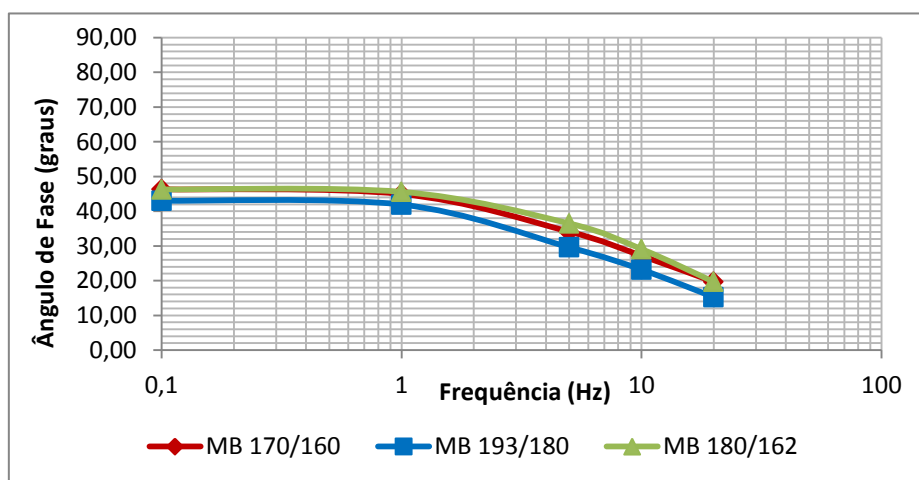


Figura 4.24 - Representação do ângulo de fase para as misturas betuminosas em estudo ignorando os resultados para as frequências 0,2Hz e 50Hz

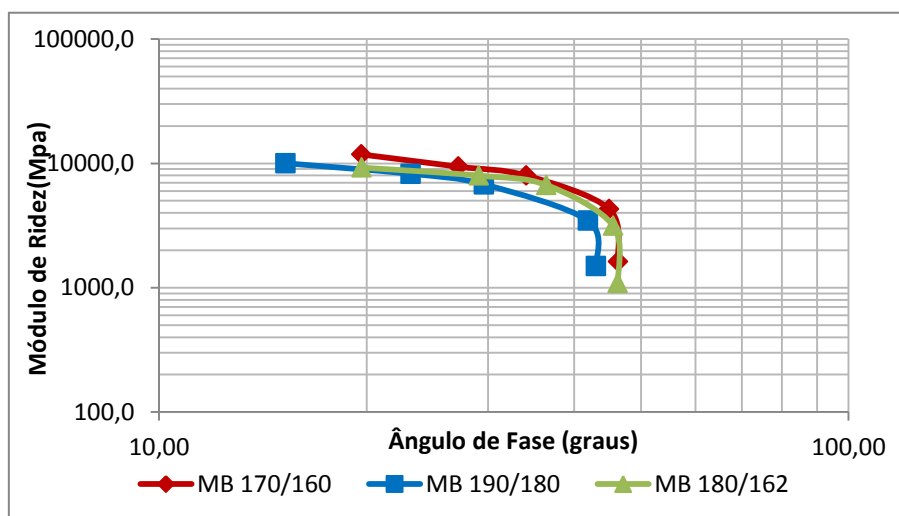


Figura 4.25 – Relação entre módulo de rigidez e o ângulo de fase para as misturas betuminosas em estudo ignorando os resultados para as frequências 0,2Hz e 50Hz

De acordo com a Figura 4.23, todas as misturas betuminosas em estudo apresentam um acréscimo do módulo de rigidez de forma mais acentuada até 5Hz, o qual, a partir desse valor de frequência assume um crescimento mais lento. Pode constatar-se que a MB170/160 é a que apresenta maior módulo de rigidez enquanto a MB193/180 apresenta valores superiores à MB180/162.

Quanto ao ângulo de fase, verifica-se que a MB193/180 apresenta menor valor deste parâmetro que as restantes misturas, evidenciando uma melhor propensão para resistir às deformações permanentes. Esta análise está de acordo com os resultados obtidos pela realização do ensaio de pista. Para as MB180/162 e MB170/160 não se verificam diferenças significativas do ângulo de fase.

Para se ter melhor percepção das grandezas deste parâmetro, referem-se os valores obtidos para uma frequência arbitrária de 10Hz. Os valores obtidos para as restantes frequências aplicadas estão presentes no Quadro K 1, anexo K.

Quadro 4.15 – Valores do módulo de rigidez e ângulo de fase para as misturas em estudo obtidos para uma frequência de 10Hz

Identificação da Mistura	Módulo de Rigidez (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
MB 170/160	9408,7	27,18
MB 193/180	8243,6	23,19
MB 180/162	7971,6	29,09

De acordo com Pais & Pereira (2002), a rigidez depende da temperatura e do tempo de carregamento. Assim sendo pode definir-se uma rigidez elástica quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento e rigidez viscosa para altas temperaturas e longos períodos de carregamento. A rigidez elástica corresponde a valores mais elevados da rigidez.

Por outro lado, o ângulo de fase corresponde ao desfasamento observado entre as tensões e as deformações. O comportamento do betume é predominantemente elástico quando o ângulo de fase é nulo e torna-se viscoso quando o valor do ângulo aumenta.

Tendo em conta a informação bibliográfica anterior, os valores representados nas Figura 4.23 e Figura 4.24 apresentam valores antagónicos, uma vez que, sendo a MB170/160 a que apresenta maior módulo de rigidez, tem maior componente elástica, logo deveria ter menor ângulo de fase. Esta contrariedade de valores pode estar relacionada com a forma de obtenção dos valores dos respectivos parâmetros para uma extensão de 50 $\mu\text{m/m}$. As médias das vigas para dada frequência, foram calculadas através da média de valores obtidos para um intervalo próximo à extensão pretendida ou através de regressões gráficas, consoante a melhor aplicabilidade de cada caso. De qualquer forma, ambos os métodos utilizados podem levar a uma margem de erro considerável.

Por último, a variação do módulo de rigidez com o ângulo de fase é apresentada na Figura 4.25, em que é visível a diminuição da componente elástica do módulo de rigidez com o aumento do ângulo de fase.

Resistência à Fadiga

Os ensaios de fadiga conduziram aos resultados que se apresentam no Quadro L 1 do anexo L e na Figura 4.26, expressos pela extensão de tracção aplicada e respectiva vida à fadiga. Os coeficientes de lei de fadiga e respectivos parâmetros complementares estão anunciados no Quadro 4.16.

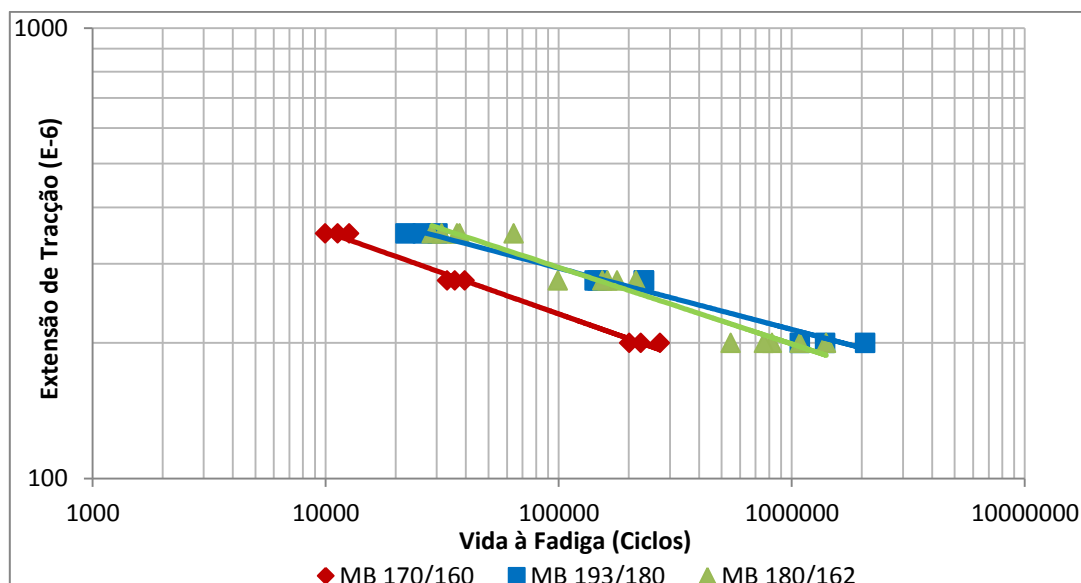


Figura 4.26 – Vida à fadiga associada a cada uma das misturas em estudo

Quadro 4.16 – Coeficientes das leis de fadiga das misturas betuminosas

Mistura	a	b	R ²	N ₁₀₀	ε ₆
MB 170/160	1900,3	0,183	0,991	9,73E+06	151,64
MB 193/180	1407,5	0,136	0,9758	2,78E+08	215,01
MB 180/162	2083,9	0,170	0,952	5,73E+07	199,01

Os resultados obtidos permitem concluir que a MB 193/180 apresenta maior resistência à fadiga para um número de ciclos maior, seguida da MB 180/162, sendo a MB170/160 a que se mostra menos resistente. Se o comportamento for avaliado em termos de número de ciclos que a mistura suporta para uma extensão de tracção de 100×10^{-6} , então a MB193/180 apresenta uma vida à fadiga cerca de 28 vezes superior à MB 170/160.

Nos ensaios de extensão controlada verifica-se usualmente uma diminuição da vida à fadiga para módulos de rigidez mais elevados. Assim sendo, os dados anteriormente analisados estão de acordo com os resultados da Figura 4.24, uma vez que a MB 170/160 apresenta um modulo rigidez superior e menor resistência à fadiga

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

As principais ilações a retirar deste trabalho são:

- As temperaturas de mistura e compactação têm um papel preponderante no desempenho das misturas betuminosas. Sendo que a temperatura de fabrico é essencial para garantir que o betume tem a viscosidade necessária para que este envolva adequadamente os agregados durante o processo de fabrico, enquanto a temperatura de compactação, deve garantir que as partículas de agregado constituam uma estrutura compacta, resistente, durável, coesa e com o volume de vazios definido no projecto;
- De forma a responder às novas exigências estruturais e funcionais dos pavimentos, tem vindo a ser estudada a melhoria das características mecânicas, pela adição de polímero ao betume convencional. No entanto a selecção adequada das temperaturas para manusear os betumes modificados tem sido um problema, pois não existe actualmente um método definido para o seu cálculo;
- Neste trabalho, avalia-se o efeitos das temperaturas propostas pelo produtor (170°C/160°C) e determinadas segundo duas metodologias alternativas, Superpave (193°C/180°C) e HSRV-E (180°C/162°C), no desempenho e comportamento mecânico de uma mistura betuminosa rugosa com betume modificado com SBS;
- O desempenho e comportamento mecânico foi avaliado através da realização de ensaios de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, determinação do módulo de rigidez, resistência à fadiga e ainda através do ensaio de compactabilidade;
- No ensaio de compactabilidade, a mistura cujas temperaturas foram obtidas pelo método HSRV-E, apresenta um valor de resistência à compactação de cerca do dobro relativamente aos valores apresentados pelas outras duas misturas.
- Do ensaio de sensibilidade à água resultaram valores de ITSR compreendidos no intervalo de 87% a 94%, sendo que o maior valor corresponde à mistura betuminosa produzida com as temperaturas obtidas pelo método Superpave. Atendendo ao valor de repetibilidade presente na respectiva norma, podemos constatar que a variação de valores obtidos não é significativa. Por outro lado, os valores obtidos são todos superiores a 80%, sendo esta percentagem o valor de referência, correspondente à resistência conservada para misturas betuminosas rugosas. Desta forma, podemos afirmar que as três temperaturas em estudo, garantiram valores de resistência à água satisfatórios.

- No ensaio de pista, as misturas produzidas às diferentes temperaturas apresentaram resultados similares, em que as rodeiras atingidas no final dos ensaio estão no intervalo dos 4,4mm e 4,7mm;
- Quanto ao ensaio de determinação do módulo de rigidez e ângulo de fase, verifica-se um aumento do módulo de rigidez e diminuição do ângulo de fase com o aumento da frequência aplicada. O que significa que para tempos de carregamento mais curtos o material tem tendência a tornar-se cada vez mais elástico, apresentando maior propensão para as deformações permanentes, no entanto com melhor comportamento à fadiga.
- Relativamente ao ensaio de fadiga, as temperaturas aplicadas na produção das misturas betuminosas, traduziram-se em resultados com diferenças significativas. A mistura betuminosa produzida com as temperaturas obtidas pelo método Superpave mostra-se mais resistente, sendo a mistura produzida com as temperaturas recomendadas pelos produtores a que apresenta uma vida à fadiga mais curta. A MB193/180 apresenta uma vida à fadiga cerca de 28 vezes superior à MB 170/160.
- Tendo em conta os resultados dos ensaios efectuados, apesar das temperaturas elevadas obtidas pelo método Superpave, quando aplicadas na produção de misturas betuminosas com SBS, não se traduzem em piores resultados, o que permite constatar que estas não resultam num envelhecimento do betume. Este facto pode estar relacionado com o facto do polímero utilizado reduzir a susceptibilidade térmica do betume.
- Em suma, pelos resultados obtidos o efeito das temperaturas mostrou ter maior influência nos ensaios de compactabilidade e resistência à fadiga, sendo que para ambos os ensaios, as misturas apresentaram uma variação de valores significativa.

5.2. Desenvolvimentos Futuros

Como continuidade ao estudo desenvolvido, sugere-se o desenvolvimento de alguns trabalhos.

Primeiramente, seria interessante estudar o efeito das mesmas temperaturas de produção e compactação em misturas betuminosas distintas, com outro tipo de polímero, outro tipo de agregado ou mesmo para outro tipo de camada betuminosa.

Do mesmo modo, sugere-se a avaliação da adição de um fíler distinto, como forma a averiguar a sua influência no desempenho e comportamento mecânico das misturas betuminosas.

Propõe-se ainda o estudo de outros métodos que têm vindo a ser desenvolvidos, por forma a perceber qual seria o mais viável para aplicação aos betumes modificados, traduzindo-se na determinação das temperaturas adequadas à produção dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

(Asphalt Institute, 2011) - Asphalt Institute Technical Advisory - *Determination of Laboratory Mixing and Compaction Temperatures for Hot-Mix Asphalt*, Guidance Document, 2011.

(Barbosa,2012) - Barbosa, F. - *Contribuição para o Estudo do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

(Barnes, 2000) - Barnes, H. - *A Handbook of Elementary Rheology*, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, University of Wades, 2000.

(Barnes et al., 1989) - Barnes, H.; Hutton, J. & Walters K. - *An Introduction to Rheology*, Amsterdam, 1989.

(Batista, 2004) - Batista, F. - *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos- Misturas betuminosas densas a frio*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto,2004.

(Bernucci et al., 2008) - Bernucci, L.; Motta,L.; Ceratti, J. & Soares, J. - *Pavimentação Asfáltica, Formação Básica para Engenheiros*, Capítulo 4, Associação Brasileiras das Empresas Distribuidoras de Asfalto, Rio de Janeiro, 2008.

(Bernucci et al., 2008) - Bernucci, L.; Motta,L.; Ceratti, J. & Soares, J - *Pavimentação Asfáltica, Formação Básica para Engenheiros*, Capítulo 6, Associação Brasileiras das Empresas Distribuidoras de Asfalto, Rio de Janeiro, 2008

(Capitão et al., 2001) - Capitão, S. D.; Santos, P.& Pais, J. C. - *Estabelecimento de misturas betuminosas para camadas estruturalmente importantes da formulação analítica à composição final*, Jornadas de Estradas e Pontes dos Países de Língua Portuguesa, Lisboa, 2001.

(Cardoso, 2002) - Cardoso, A. - *Estudo em Laboratório do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Utilizadas em Pistas Experimentais*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

(Cepssa, 2007) - Cepssa Betumes - *Manual de Pavimentação*, 2ª Edição, 2007. Disponível em www.cepssa.com.

(Dias, 2009) - Dias, J. - *Influência do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2009.

(Effting, 2013) - Effing, C. - *Aula 3: Agregados, Propriedades Físicas*, Departamento de Engenharia Civil, Joinville, 2013.

(Estradas de Portugal S.A., 2012) - Estradas de Portugal. S.A. - *Caderno de Encargos Tipo Obra - 14.03 Pavimentação, Características dos Materiais*, Almada, 2012.

(EAPA, 2010) - European Asphalt Pavement Association - *The use of Warm Mix Asphalt*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, 2010.

(FHWA, 2001) - Federal Highway Administration's - *Superpave Mixture, Design Guide*, WestTrack Forensic Team Consensus Report, Washington, 2001.

(Ferreira, 2009) - Ferreira, C., - *Avaliação do Desempenho das Misturas Betuminosas Temperadas*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2009.

(Gardete, 2006) - Gardete, D. - *Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciencias e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.

(Gardete et al., 2009) - Gardete, D.; Picado, L., & Capitão, S.- *Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas - Análise dos níveis de compactação para formulação de um AC 20 e de um SMA*, XV congresso IberoLatino-Americano do Asfalto, Lisboa, 2009.

(Huerne, 2004) - Huerne, H. L. - *Compaction of asphalt pavements*, PHD Thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands, 2004.

(Jacobs & Sluer, 2009) - Jacobs, M. & Sluer, B. -. *Fatigue Testing of Polymer Modified Asphalt Mixtures*, 2º Workshop on Four Point Bendeing, Universidade do Minho, pags.115–122, Minho, 2009.

(Jonsson, 2000) - Jonsson, M. - *Influence of vibration frequency and amplitude on asphalt compaction*, Licentiate thesis, Royal Institute of Tecnology, Stockholm, Sweden.

(Kandhal, 1983) - Kandhal, P. - *Specification for Compaction of Asphalt Pavement*, Bituminous Testing and Research Engineer, Pennsylvania Department of Transportation, Harrisburg, Pennsylvanis, 1983.

(Loureiro, 2003) - Loureiro, T. - *Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003

(Matos, 2012) - Matos, P. - *Temperaturas de Fabrico e Compactação de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados: Interação Agregado-Betume*, Dissertação de Mestrado, Departamento Engenharia Civil, Faculdade de Ciencias e Tecnologia, Univercidade Nova de Lisboa, Caparica, 2012.

(Menezes, 2008) - Menezes, M. - *Estudo das Características das Superfícies dos Pavimentos Rodoviários para Análise da Segurança de Tráfego*, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

(Micaelo, 2008) - Micaelo, R. - *Compactação de Misturas Betuminosas, Ensaio de Campo e Modelação Numérica*, Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia do Porto, Porto, 2008.

(Montanari, 2007) - Montanari, R. - *Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio e a Quente para Fins de Pavimentação de Vias*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2007.

(Motta & Leite 2000) - Motta, L. & Leite, L. - *Efeito do Filer nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas*. Anais do 11º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.

(Pais & Palha, 2010) - Pais, J. & Palha, C. - *Resistência à fadiga em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários*, 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, pags.21–23, Guimarães, 2010.

(Pais et al., 2008) - Pais, J.; Pereira, P.; Gardete, D. & Minhoto, M. - *O comportamento de misturas betuminosas com betume modificado com borracha*, 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, 2008.

(Pais & Pereira, 2002) - Pais, J. & Pereira, P. - *A influencia da temperatura na rigidez das misturas betuminosas*, 2º Congresso Rodoviário Português - Estradas 2002, pags. 295-304, Lisboa, 2002

(Pereira, 2009) - Pereira, F. - *Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2009.

(Philippe & Filho, 2009) - Philippe, A. & Filho, A. - *Asfalto Modificado com Polímero (SBS)*, Universidade Católica do Salvador, 2009.

(Picado Santos et al., 2011) - Picado Santos, L.; Branco, F. & Pereira, P. - *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, 4ª Reimpressão, Coimbra, 2011.

(Pinto, 1991) - Pinto, S. - *Estudo do comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*, Dissertação de Doutoramento, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

(Read & Whiteoak, 2003) - Read, J. & Whiteoak, D. - *The Shell Bitumen Handbook*, London, Thomas Telford, 2003.

(Robert et al., 1996) - Robert, F.; Kandhal, P.; Brown, E.; Lee, D. & Kennedy, T. - *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture, Design and Construction*. Segunda Edição, NAPA, Education Foundation, Lanham, Maryland, 1996.

(Santos, 2011) - Santos, A. - *Temperatura de Fabrico e Compactação de Misturas Betuminos com Betumes Modificados*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciencias e Tecnologia, Univercidade Nova de Lisboa, Caparica, 2011.

(Shell, 1990) - Shell - *The Shell Bitumen Handbook*, Shell Bitumen UK, London; UK, 1990.

(Silva, 2005) - Silva, H. - *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique, Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*, Dissertação de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2005.

(Sombre et al., 1998) - Sombre, R.; Newcomb, D.; Chadbourn, B. & Voller, V. - *Parameters to Define the Laboratory Compaction Temperature Range of Hot-Mix Asphalt*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.67, 1989.

(West et al., 2010) - West, R.; Watson, D.; Turner, P. & Casola, J. - *Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 648, Whashington, Transportation Research Board, 2010.

(Yildirim, 2007) - Yildirim, Y. - *Polymer Modified Asphalt Binders*. Construction and Building Materials 21, pags.66–72, 2007.

(Yildirim, 2006) - Yildirim, Y.; Ideker, J.& Hazlett, D. - *Evaluation of Viscosity Values for Mixing and Compaction Temperatures*. Journal of Materials in Civil Engineering, pags. 545–553, 2006.

(Yildirim et al., 2000) - Yildirim, Y.; Solaimanian, M. & Kennedy, T. - *Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete*, Report n.º1250-5, Austin, University of Texas, 2000.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 14023:2005 - *Bitumen and bituminous binders - Framework specification for polymer modified bitumens*. Brussels, CEN, October 2010.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 13043:2004 – *Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação*. Bruxelas, CEN, 2004.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 13108-1:2008 – *Misturas betuminosas – Especificações dos materiais, Parte 1: Betão Betuminoso*. Bruxelas, CEN, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 13320:2010 - *Bitumen and bituminous binders – Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus*. Brussels, CEN, March 2010.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 933-1:2000 – *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise Granulométrica – Método de Peneiração*. Bruxelas, CEN, 2000.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 1097-6:2003 – *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*. Bruxelas, CEN, 2003

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – Anexo Nacional da NP EN 1097-6:2003 – *Misturas betuminosas aplicadas em Portugal enquadradas na NP EN 13108-1*. Bruxelas, CEN, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-35:2004 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 35: Laboratory mixing*. Brussels, CEN, July 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-5:2002 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density*. Brussels, CEN, July 2002.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 12697-6:2003+A1:2010 – *Misturas betuminosas - Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente – Parte 6: Determinação da baridade de provetes betuminosos*. Bruxelas, CEN, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-8:2003 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. Brussels, CEN, March 2003.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 12697-34:2004+A1:2010 – *Misturas betuminosas - Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente – Parte 34: Ensaio de Marshall*. Bruxelas, CEN, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-39:2004 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 39: Binder content ignition*. Brussels, CEN, October 2004.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 12697-30:2004+A1:2009 – *Misturas betuminosas - Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente – Parte 30: Preparação de provetes por compactador de impacto*. Bruxelas, CEN, 2009.7

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-33 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 33: Specimen prepared by roller compactor*. Brussels, CEN, December 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-10:2001 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 10: Compatibility*. Brussels, CEN, November 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-12 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. Brussels, CEN, June 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-23 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. Brussels, CEN, July 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-22:2003+A1 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel Tracking*. Brussels, CEN, July 2007.


EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-24:2004+A1 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue*. Brussels, CEN, July 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-26 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness*. Brussels, CEN, July 2004


ANEXOS

ANEXO A - RELATÓRIO DE ENSAIO DO BETUME MODIFICADO


Relatório de Ensaio



probigalp
SISTEMAS DE TRATAMENTO DE BETUMES E MISTURAS BETUMINOSAS



nidin
Núcleo de Investigação e Desenvolvimento em Infraestruturas



IPAC
accreditação

L0551
Ensaio

Relatório de ensaio nº	RE 2013/0274
Refª Interna	A 2013/0274
Data de Emissão	13-Set-13

Cliente
NIDIN - Estágios

Anexos (boletins Ensaio)
BE 2013/0800 BE 2013/0801 BE 2013/0802
BE 2013/0803 BE 2013/0804 BE 2013/0805
BE 2013/0806 BE 2013/0807 BE 2013/0808

1. Amostra Página : 1 / 2

1.1 Data recepção: 18-Abr-13 Produto: Betume Performance PMB 45/BD-65
N.º do Lote: Amostra Refª Externa:

1.2 Caracterização da amostra: Consistência: Sólido Presença de Contaminantes: Não

2. Colheita da amostra

3. Preparação da amostra Responsabilidade da colheita da amostra: Cliente

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	2	T fluidificação [°C]	155
Tempo aquecimento [min]	90	Tipo de agitação	Manual

4. Resumo ensaios

Data de realização do(s) ensaio(s):	de 18-Abr-13 a 19-Abr-13
Ensaio	Norma
Determinação da penetração	NP EN 1426 : 2010
Boletim Ensaio	Resultado
BE 2013/0800	51 (1/10mm)
Ensaio	Norma
Determinação da temperatura de amolecimento	NP EN 1427 : 2010
Boletim Ensaio	Resultado
BE 2013/0801	72,8 °C
Ensaio	Norma
(*) Determinação da recuperação elástica de betumes modificados	EN 13398 : 2010
Boletim Ensaio	Resultado
BE 2013/0802	97 %
Ensaio	Norma
(*) Determinação da viscosidade Dinâmica	EN 13302 : 2010
Boletim Ensaio	Res. A 135°C
BE 2013/0803	1650 (mPa.s)
Ensaio	Norma
(*) Determinação do ponto de fragilidade de Fraess	EN 12593 : 2007
Boletim Ensaio	Resultado
BE 2013/0804	-15 °C
Ensaio	Norma
(*) Determinação da Resistência ao envelhecimento - RTFOT	NP EN 12607-1 : 2010
Boletim Ensaio	Resultado
BE 2013/0805	88 % Pen. Ret. -2,8 °C Dif. Tem. -0,02 % Var. Massa

5. Observações

Amostra para Estagiários
VSR a 115°C

Os ensaios assinalados com (*) não se encontram acreditados.


O responsável técnico
Carla Mendes Duarte
Cátia Mendes Duarte

Unidade de Produção do Rio Maior (Sede)
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior
Tel.: +351 243 999 240 | Fax: +351 243 998 240
E-mail: rmaior@probigalp.pt

Mod 0016.03
Rev 03 | 14-Nov-2012


Figura A 1 – Relatório de ensaio do betume PMB 45/80-65, Pag.1

Relatório de Ensaio



LABORATÓRIO DE ENSAIOS S.A.

Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



Núcleo de Investigação e Desenvolvimento em Infraestruturas

Cliente

NIDIN - Estágios



acreditação

L0551
Ensaio

Relatório de ensaio nº RE 2013/0274

Refª Interna A 2013/0274

Data de Emissão 13-Sep-13

Anexos (boletins Ensaio) BE 2013/0800 BE 2013/0801 BE 2013/0802
BE 2013/0803 BE 2013/0804 BE 2013/0805
BE 2013/0806 BE 2013/0807 BE 2013/0808

1. Amostra Página : 2 / 2

1.1 Data recepção: 18-Abr-13 Produto: Betume Performance PMB 45/80-65

N.º do Lote: Amostra Refª Externa:

1.2 Caracterização da amostra:

Consistência: Sólido Presença de Contaminantes: Não

2. Colheita da amostra

Responsabilidade da colheita da amostra: Cliente

3. Preparação da amostra

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/lts]	2	T fluidificação [°C]	155
Tempo aquecimento [min]	90	Tipo de agitação	Manual

4. Resumo ensaios

Data de realização do(s) ensaio(s): de 18-04-13 a 19-04-2013

Ensaio	Boletim Ensaio	Resultado	Norma
(*) Ponto de Inflamação	BE 2013/0806	310 °C	EN ISO 2592 : 2001
(*) Microscópio	BE 2013/0807	Classificação P/H/SU/r	EN 13632:2010
(*) Solubilidade	BE 2013/0808	99,45 %	NP EN 12592:2010

5. Observações

Amostra para Estágios
VSR a 115°C

Os ensaios assinalados com (*) não se encontram acreditados.

O responsável técnico
Cátia Mendes Duarte


Figura A 2 - Relatório de ensaio do betume PMB 45/80-65, Pag.2

ANEXO B – CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS

Quadro B 1– Percentagem de material passado


Peneiros Série Base + Série 2 (mm)	INERTES - % MATERIAL PASSADO			
	Fíler Comercial Granulometria	Pó de Pedra 0/6 Granulometria	Brita 8,5/12 Granulometria	Brita 10/16 Granulometria
63,00	100,00	100,0	100,00	100,0
40,000	100,00	100,0	100,00	100,0
31,500	100,00	100,0	100,00	100,0
20,000	100,00	100,0	100,00	100,0
16,000	100,00	100,0	100,00	98,6
14,000	100,00	100,0	100,00	73,2
12,500	100,00	100,0	100,00	35,6
10,000	100,00	100,0	81,93	4,7
8,000	100,00	100,0	40,98	1,5
6,300	100,00	99,8	13,76	1,1
4,000	100,00	80,8	4,71	0,9
2,000	100,00	52,4	1,24	0,8
1,000	100,00	32,6	0,80	0,7
0,500	100,00	21,6	0,74	0,7
0,250	100,00	14,8	0,70	0,7
0,125	97,37	11,1	0,66	0,7
0,063	74,14	8,7	0,59	0,6

ANEXO C – FICHAS TÉCNICAS DOS AGREGADOS



eurocálcio
CIMENTOS E INERTES, SA

FICHA TÉCNICA DO PRODUTO Nº01 - Rev.10



EUROCÁLCIO - Calcários e Inertes, SA
 Vale de Oeiras - S. Martinho - Apartado 95 - 2446-906 Fátima
 Centro de Produção - Fábrica "Vale de Oeiras"

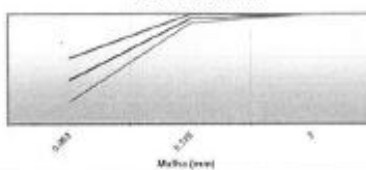
<p>06</p> <p>NP EN 13043:2004/AC:2010 Agregados Misturas Betumínicas CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01944</p>	<p>NP EN 12620:2002+A1:2010 Agregados para Betão CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01472</p>	<p>05</p> <p>NP EN 13139:2005/AC:2010 Agregados para Argamassas CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01473</p>
<p>Desig. Comercial: RC 480</p>		
<p>Caracterização</p>		
<p>Tipo de agregado</p>		
<p>REQUISITOS FÍSICOS</p>		
Qualidade dos Fios - Azul Merleto	MD = 2g/kg	MD, 10
Massa Volumica das partículas	2,71 Mg/m³	2,71x0,1 Mg/m³
Tipo de Humidade	NA	< 0,5 %
Variação de teor de água compactado (Rigido)	NA	0,00
"Variação de temperatura areia e betão"	NA	0,00
Solubilidade na Água	NA	< 0,2 %
Susceptibilidade à Água	NA	0,00
"Número de bolhas"	NA	0,00
Superfície Específica - Método Blaine	NA	3500 cm²/g
Durabilidade: Resistência Alcali-Silica	6,00%	NA
<p>REQUISITOS QUÍMICOS</p>		
Teor de Cloretos	< 0,001%	NA
Sulfatos solúveis em ácido	AS ₂	NA
Enxofre total	< 0,04%	NA
Teor de húmus	mais dados	NA
Teor de Carbonato	44±1%	NA
	99±1%	NA
<p>Descrição Petrográfica Simplificada</p>		
Agregado	Mixtos	Forma e Angulosidade
Fragmentos de rocha	Calcário	Forma: subesférica a subangular Angulosidade: muito regular a subangular
<p>Condições de superfície</p>		
<p>Regular</p>		

Nota: Produto obtido a partir de pedras naturais, pelo que está sujeito a algumas variações (ver) resultados do processo de formação da própria pedra.

GRANULOMETRIA

Malha (mm)	Granulometria Típica (%)	Tolerâncias	
		Valor Mínimo	Valor Máximo
2	100	100	100
0,125	99	98	100
0,063	85,0	80,0	90,0

Fuso Granulométrico



Elaborou:	Aprovou:	Data: 30-04-2012
-----------	----------	------------------

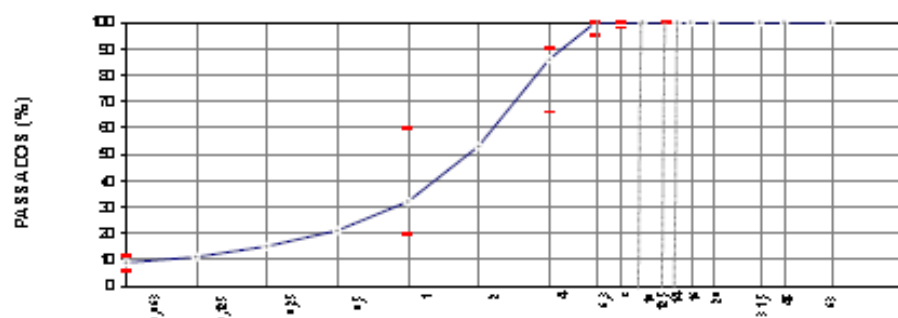
Figura C 1– Características do fíler RC480

Designação Comercial:	Pó de Pedra D6	Origem:	Vale Grande
Utilização:	NP EN 12620:2002+A1:2010 (Materiais não ligados e ligados); NP EN 13043 (Misturas betumíneas); NP EN 12620:2002+A1:2010 (Bêto)		

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Descrição petrográfica: Calcinado de precipitação, não de aspecto compacto, homogêneo com granularidade muito fina (ataático), de cor branca bege e cinzento.

Distribuição granulométrica				Outras características			
Peneira (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)	Característica	NP EN 13042	NP EN 13043	NP EN 12620
				Dimensão nominal (mm)	D6		
				Granulometria	$G_{95} \leq G_{90} \leq 2$	$G_{95} \leq G_{90} \leq 2$	G_{95}
				Teor de finos	f_{90}		
63	100			Qualidade dos finos	DND		
40	100			Massa Volumétrica ¹			
31,5	100			- Material imprensável	$2,1 \pm 0,15$ Mg/m³		
20	100			- Partículas arredondadas em estado	$2,15 \pm 0,15$ Mg/m³		
16	100			- Partículas esferizadas	$2,11 \pm 0,15$ Mg/m³		
14	100			Absorção de Água	$\leq 1,1\%$		
12,5	100	100	100	Porcentagem de partículas quebradas	$C_{w,u}$	$C_{w,m}$	
10	100			Teor de ácidos solúveis em ácido ¹	$AS_{w,u}$		$AS_{w,u}$
8	100	98	100	Teor de enxofre total ¹	S_t		$\leq 1\%$
6,3	100	98	100	Teor de humidade ¹	$h_{m,u}$		$h_{m,u}$
4	86	66	90	Contaminantes orgânicos livres		DND	
2	53			Resistência à Fragmentação	DND		
1	32	20	60	Resistência ao Choque Térmico		DND	
0,5	21			Resistência ao Degradação	DND		
0,25	15			Resistência ao Polimento		DND	
0,125	11			Atividade dos F. articular no betume	DND		
0,063	8,8	5,8	11,8	Resistência à Abrasão	DND		
Controlo da produção				Resistência ao Gelo-Degelo		DND	
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo	Retração por secagem ¹			$\leq 1,1\%$
MF	3,81	3,31	4,31	Teor Cloratos			$\leq 1,1\%$
CF	4,68	4,18	5,18	Reação Alcali-Silica			DND



¹Valor determinado sobre outro produto com a mesma origem (Fragão e, A. Tub-Ventil F)

²Valor determinado sobre outro produto com a mesma origem (Pó de Pedra e A)

DND - Desempenho não determinado

Data: 07-02-2013

O Responsável:

Barbosa



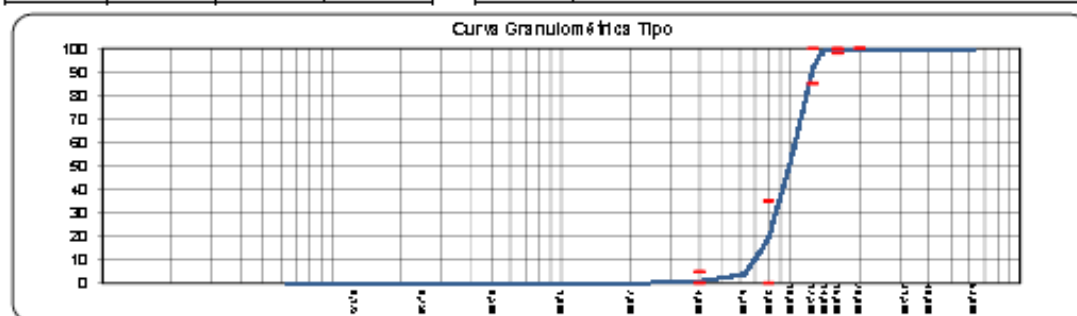
Figura C 2 – Características do pó de pedra 0/6mm

Ficha Técnica de Produto

Produto: Brita Basalto Nº1 RM (8/12,5 mm) Centro de Produção: Rio Maior

Norma de Produto: NP EN 12620:2004/AC:2010 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)	Características	NP EN 12620
				Certificado CE	1592-CPD-0609
63,000	100			Dimensão (d/D)	8/12,5 mm
40,000	100			Granulometria	G _c 85/95
31,500	100			Tolerância da Granulometria Típica	GT _c 10
20,000	100	100	100	Teor de Finos	f ₁
16,000	100	98	100	Qualidade dos Finos	NA
14,000	100			Índice de Achatamento	FI _{1,2}
12,500	92	85	100	Índice de Forma	SI _{1,2}
10,000	53			Coefficiente de Los Angeles	LA ₂₅
8,000	20	0	35	Coefficiente de Micro-Deval	M _{0,25} 20
6,300	4			Coefficiente de Polimento Acelerado	PSV ₂₆
4,000	1	0	5	Massa Volumica	
2,000	0			material impermeável	2,95 Mg/m ³
1,000	0			partículas secas em estado	2,85 Mg/m ³
0,500	0			partículas saturadas	2,89 Mg/m ³
0,250	0			Absorção de Água	1,1 %
0,125	0			Baridade	1,51 Mg/m ³
0,063	0,2			Porcentagem de vazios	47 %
				Teor de Cloretos	NA
				Teor de Sulfatos	NA
				Reação Alcalina-Silica	NA
				Sulfatos solúveis em ácido	NA
				Teor de Enxofre	NA
				Teor de Humidade	NA
				Teor de Ácido Fólvico	NA
				Contaminantes Leves	NA
				Contaminantes orgânicos pelo método da argamassa	
				Aumento do tempo de presa	NA
				Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias	NA
				Retração por secagem	NA
				Observações:	
				NA- Não aplicável	



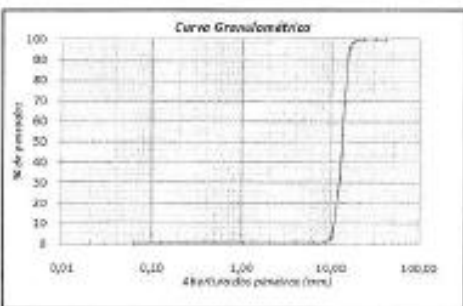
Elaborou: (ORIGINAL ASSINADO) Aprovou: (ORIGINAL ASSINADO) Emitido: 06-12-2011

Figura C 3 – Características da brita 8/12,5mm

 <p>ALVES RIBEIRO, S.A.</p>	<p>Sede: Rua Sancha Cordeiro, 31-P, 1045-028 Lisboa Pedreira: Moita da Ladra Nº 2028, 2825-622 Vialonga, Vila Franca de Xira Av. da Constituição Nº 14 Moita da Ladra C. R. L. de Lisboa com o número único de matrícula e de pessoa coletiva 680018938 Capital Social 113.290.000,00€</p>	<p>Ficha Técnica do Produto</p> <p>CE 0866 05</p>
	<p>0866-CPD-2005/CE.037</p> <p>NP EN 13043-Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação → NP EN 12620 + A1-Agregados para betão</p>	
Caracterização do Produto	Produto: Brita 2	
	Dimensão do Agregado: 10/16	
	Origem: Pedreira Moita da Ladra-Vialonga	
	Identificação Petrográfica: Basalto	

Propriedades	NP EN 13043	NP EN 12620
Forma dos partículas		
Índice de arredamento		F_{ls}
Índice de forma		SI_{ls}
Granulometria		
	$G_{250/10}$	$G_{250/20}$
	$\rho_s 3,00 \pm 0,05 \text{ Mg/m}^3$	
Massa volumica das partículas		
	$\rho_{25} 2,59 \pm 0,05 \text{ Mg/m}^3$	
	$\rho_{25} 2,54 \pm 0,05 \text{ Mg/m}^3$	
Limpeza		
Teor de finos	f_2	$f_{1,5}$
Qualidade dos finos		NA
Afinidade aos ligantes betuminosos	DND	NA
Resistência à fragmentação/esmagamento		LA_{25}
Resistência ao polimento	DND	
Resistência à abrasão	DND	
Resistência ao desgaste por atrito		$M_{25/10}$
Resistência à abrasão provocada por pneus pitonados	DND	NA
Resistência ao choque térmico	$V_{25} 1$	NA
Resistência ao gelo-degelo		DND
Composição teor		
Cloreto	NA	< 0,01%
Sulfatos solúveis em ácido	NA	AS_{25}
Eléctro total	NA	0,02%
Contaminantes Leves	$m_{25} < 0,1$	< 0,1%
Teor de Humus	NA	Não contém mat. org. orgânicas
Teor de carbonato	NA	DND
Estabilidade volumétrica		
Retração por secagem	NA	0,035%
Absorção de água		$0,9 \pm 0,1 \% \cdot W_{25} 1$
Emissão de radioactividade	DND	
Libertação de metais pesados	DND	
Libertação de compostos de carbono poliaromáticos	DND	
Libertação de outras substâncias perigosas	DND	
Durabilidade face à meteorização	DND	
Durabilidade face à reacção álcalis-silica	NA	14 dias - 0,01%

Granulometria Típica			
Abertura do peneiro (mm)	% de passados, em massa	Máximo	Mínimo
40,00	100		
31,50	100	100	100
22,40	100	100	100
20,00	100		
16,00	96	90	90
14,00	70		
12,50	33		
10,00	4	10	0
8,00	1		
6,30	1		
4,00	1	2	0
2,00	1		
1,00	1		
0,600	1		
0,250	1		
0,125	1		
0,063	0,5		



NA- Não aplicável, DND-Desempenho não determinado

Aprovado por:

Data:

07-07-2011

Figura C 4 – Características da brita 10/16mm

ANEXO D - TEMPERATURAS DE MISTURA E COMPACTAÇÃO ACONSELHADAS PELOS PRODUTORES

BETUMES MODIFICADOS

35/50 mod- 50/70 mod – IP mod –
RIGI mod – ELASTO mod – 80/130 mod



Os betumes modificados com polímeros destinam-se a dar cumprimento aos cadernos de encargos actualmente em vigor, assim como a dar resposta a situações específicas de solidificação dos pavimentos.

A modificação dos betumes confere-lhes características que permitem uma melhoria na recuperação elástica e adesividade aos agregados, menor susceptibilidade a temperaturas extremas e maior resistência ao envelhecimento, à fadiga e deformações permanentes dos pavimentos.

Aplicações

Camadas de desgaste de rodovias em especial rugosas e drenantes, camadas delgadas, misturas de alto módulo, sistemas anti-fissuras.

Produtos	Aplicações
Galp 35/50 mod- 50/70 mod	Misturas rugosas e drenantes.
Galp IP mod	Rugosas, drenantes e camadas finas; zonas sujeitas a temperaturas extremas.
Galp RIGI mod	Misturas de alto módulo.
Galp ELASTO mod	Sistema anti-fissuração.
Galp 80/130 mod	Membranas absorventes de tensões e anti-fissuras.

Existem outros betumes modificados dirigidos para fins específicos. Contacte a Assistência Técnica de Betumes.



Execução de pavimento drenante



Aplicação em obra

		35/50 mod	50/70 mod
Temperaturas de utilização indicativas, °C <small>(dependem da viscosidade de cada produto)</small>	mistura	165-175	160-170
	compactação	155-165	150-160

Características do produto

Produto com um ponto de amolecimento mais alto que o do betume convencional e com recuperação elástica considerável. Menor susceptibilidade a temperaturas extremas.

3

Figura D 1 – Temperaturas de mistura e compactação aconselhadas pelos produtores da Galp, para betumes modificados com gama de penetração de 35/50 e 50/70.

³ Os betumes estão identificados com as nomenclaturas antigas, sendo que os valores a considerar são os apresentados para o betume 50/70 mod, pela proximidade da gama de penetração com o betume em estudo.

ANEXO E – VALORES OBTIDOS PARA EFEITO DE CÁLCULO DAS TEMPERATURAS DE PRODUÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA

Tabela E 1 – Valores de viscosidade e respectivas taxas de corte para cada temperatura considerada

Rpm	Temperaturas																	
	130		135		140		150		160		165		170		180		190	
	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$	$\gamma(s^{-1})$	$\eta(Pa.s)$
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	18,6	0,83	18,6	0,62	-	-	-	-	-	-	-	-
30	10,2	2,13	-	-	-	-	27,9	0,82	27,9	0,62	27,9	0,47	27,9	0,36	-	-	-	-
40	13,6	2,11	13,6	1,65	13,6	1,29	37,2	0,82	37,2	0,61	37,2	0,47	37,2	0,36	37,2	0,30	-	-
50	17,0	2,10	17,0	1,64	17,0	1,29	46,5	0,81	46,5	0,61	46,5	0,47	46,5	0,36	46,5	0,30	46,5	0,21
60	20,4	2,09	20,4	1,64	20,4	1,28	20,4	0,81	55,8	0,61	55,8	0,47	55,8	0,36	55,8	0,30	55,8	0,21
70	23,8	2,08	23,8	1,63	23,8	1,28	23,8	0,81	65,1	0,61	65,1	0,47	65,1	0,35	65,1	0,30	65,1	0,21
80	27,2	2,08	27,2	1,62	27,2	1,27	27,2	0,81	27,2	0,56	74,4	0,47	74,4	0,36	74,4	0,30	74,4	0,21
90	30,6	2,07	30,6	1,61	30,6	1,26	30,6	0,81	30,6	0,56	83,7	0,47	83,7	0,36	83,7	0,30	83,7	0,21
100	34,0	2,07	34,0	1,61	34,0	1,26	34,0	0,81	34,0	0,56		93,0	0,35	93,0	0,30	93,0	0,21	
120	33,6	2,11	40,8	1,60	40,8	1,26	40,8	0,80	40,8	0,55		112,0	0,36	112,0	0,30	112,0	0,21	
135	37,8	2,12	45,9	1,60	45,9	1,25	45,9	0,80	45,9	0,55		45,9	0,38	126,0	0,30	126,0	0,21	
140	39,2	2,11	47,6	1,59	47,6	1,25	47,6	0,80	47,6	0,55		47,6	0,38	130,0	0,30	130,0	0,21	
150	42,0	2,11	42,0	1,70	51,0	1,25	51,0	0,80	51,0	0,55		51,0	0,38	139,0	0,30	139,0	0,21	
160	44,8	2,11	44,8	1,69	54,4	1,25	54,4	0,80	54,4	0,54		54,4	0,37			149,0	0,21	
180	50,4	2,11	50,4	1,68	61,2	1,24	61,2	0,80	61,2	0,54		61,2	0,37			167,0	0,21	
200	56,0	2,10	56,0	1,67	56,0	1,31	68,0	0,80	68,0	0,54		68,0	0,37			195,0	0,21	

Valores considerados para o cálculo das temperaturas de produção (valores de input no Matlab)

Valores não calculados

Mudança da numeração da haste

Tabela E 2 – Parâmetros e modelo de Cross para cada temperatura considerada

Temperatura	Parâmetros de Cross		Modelo de Cross
130	η^∞	2,0579	$\eta = 2,0579 + \frac{(2,1484 - 2,0579)}{1 + (0,0617 \times \gamma)^{2,9451}}$
	η_0	2,1484	
	K	0,0617	
	m	2,9451	
135	η^∞	1,5812	$\eta = 1,5812 + \frac{(1,6678 - 1,5812)}{1 + (0,0410 \times \gamma)^{2,5700}}$
	η_0	1,6678	
	K	0,0410	
	m	2,5700	
140	η^∞	1,2357	$\eta = 1,2357 + \frac{(1,2930 - 1,2357)}{1 + (0,0307 \times \gamma)^{3,5260}}$
	η_0	1,2930	
	K	0,0307	
	m	3,5260	
150	η^∞	0,6723	$\eta = 0,6723 + \frac{(0,9175 - 0,6723)}{1 + (0,0114 \times \gamma)^{0,3628}}$
	η_0	0,9175	
	K	0,0114	
	m	0,3628	
160	η^∞	0,5561	$\eta = 0,5561 + \frac{(0,6514 - 0,5561)}{1 + (0,0050 \times \gamma)^{0,2496}}$
	η_0	0,6514	
	K	0,0050	
	m	0,2496	
165	η^∞	0,4371	$\eta = 0,4371 + \frac{(0,4969 - 0,4371)}{1 + (0,0071 \times \gamma)^{0,2489}}$
	η_0	0,4969	
	K	0,0071	
	m	0,2489	
170	η^∞	0,3335	$\eta = 0,3335 + \frac{(0,3823 - 0,3335)}{1 + (0,0413 \times \gamma)^{0,1778}}$
	η_0	0,3823	
	K	0,0413	
	m	0,1778	
180	η^∞	0,2950	$\eta = 0,2950 + \frac{(0,3022 - 0,2950)}{1 + (0,0113 \times \gamma)^{4,6947}}$
	η_0	0,3022	
	K	0,0113	
	m	4,6947	
190	η^∞	0,1905	$\eta = 0,1905 + \frac{(0,2319 - 0,1905)}{1 + (0,02319 \times \gamma)^{0,1761}}$
	η_0	0,2319	
	K	0,0272	
	m	0,1761	

ANEXO F – VALORES CONSIDERADOS PARA O MÉTODO SUPERPAVE E HSRV-E

Quadro F 1 – Valores considerados para o método Superpave

Taxa de corte (s^{-1})	Temperatura ($^{\circ}C$)	Viscosidade (Pa.s)
6,8	130	2,142
	135	1,665
	140	1,293
	150	0,848
	160	0,623
	165	0,478
	170	0,361
	180	0,302
	190	0,214

Quadro F 2 – Valores considerados para o método HSRV-E

Taxa de corte (s^{-1})	Temperatura ($^{\circ}C$)	Viscosidade (Pa.s)
500	130	2,0579
	135	1,5812
	140	1,2357
	150	0,7575
	160	0,5983
	165	0,4623
	170	0,3515
	180	0,2950
	190	0,2065

ANEXO G – ESTUDO DE FORMULAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA

Na primeira abordagem à formulação, com os agregados disponibilizados, definiram-se à priori as percentagens indicadas no Quadro G 1, as quais encaixaram entre o fuso estabelecidos no subcapítulo 3.3.1.2.

Quadro G 1 – Percentagens da Curva Granulométrica 1

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	22,5	51,0	19,0	7,5



Figura G 1 – Pó de Pedra 0/4



Figura G 2 – Brita basáltica 4/12

Os resultados revelaram estabilidades ao ensaio de compressão na prensa de Marshall inferiores ao limite de 12,5KN, deformações superiores aos valores expectáveis, de 2 a 4mm, e porosidades muito baixas. Visualmente a mistura apresentava um aspecto dúctil, quase deformável ao toque, assumindo um comportamento plástico. Possivelmente este comportamento pode estar relacionado com a introdução de 7,5% de fíler, excedendo a concentração crítica deste componente na mistura, a partir da qual, o mastique, deixa de ser viscoso, transformando o seu escoamento em não-newtoniano ou plástico (Matos, 2012).

Acresceram aos resultados negativos, a dificuldade de introduzir a quantidade correcta de betume à mistura para atingir a percentagem pretendida, devido às perdas do ligante durante o processo de mistura. Para colmatar esta dificuldade, a percentagem de betume adicionada passou a ser controlado por ensaios de ignição do betume em mufla. Outra dificuldade encontrada diz respeito à quantidade de massa a introduzir nos moldes, de modo a obter uma massa minimamente constante entre as cinco percentagens e que se traduzisse em provetes com as dimensões normativas.

Depois de efetuadas várias repetições, com a finalidade de realizar despistes de eventuais erros de execução, optou-se por alterar o pó de pedra utilizado, para um de granulometria ligeiramente superior (0/6) e alterar as percentagens granulométricas. Desta forma, a situação da ductilidade devida à excessiva quantidade de fíler ficaria resolvida. A segunda granulometria testada encontra-se no Quadro G 2.

Quadro G 2 – Percentagens da Curva Granulométrica 2

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	25,0	32,0	39,5	3,5

Estas alterações foram incapazes de colocar a mistura dentro dos limites impostos para a estabilidade e porosidade, verificando-se no entanto uma melhoria dos valores de deformação. Uma vez mais foram realizadas repetições para despistar erros de operação.

A terceira tentativa passou por testar as percentagens granulométricas que constam do Quadro G 3. Optou-se por abrir a curva granulométrica para que houvesse um acréscimo dos valores de porosidade e utilizar 5% de fíler para aumentar a coesão da mistura e consequentemente incrementar os valores de estabilidade.

Quadro G 3 – Percentagens da curva granulométrica 3

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	23,0	41,0	31,0	5,0

Com estas percentagens granulométricas produziu-se uma mistura bastante rugosa, o que resultou na consequente fragilização da mesma, reduzindo mais ainda as estabilidades, ainda que as deformações tenham encaixado dentro dos limites impostos. Com esta curva granulométrica agravou-se a problemática da porosidade, que continuava a apresentar valores muito abaixo dos valores esperados. Mais uma vez, foram feitos os necessários despistes.

Neste patamar estabeleceram-se dois parâmetros fulcrais. Em primeiro lugar, a Brita 2, que esteve até então a ser empregue, era demasiado lamelar, dificultando o processo de compactação, o que se traduzia em baixas resistência ao ensaio de compressão. Optou-se então por substituí-la por uma brita mais arredondada, com um melhor factor de forma, de granulometria 8/12,5. Em segundo lugar, considerou-se a aplicação de 5% de fíler como a percentagem ideal, para assegurar a capacidade resistente da mistura.

Partindo das segundas percentagens granulométricas, realizou-se uma nova tentativa, com as percentagens do Quadro G 4.

Quadro G 4 – Percentagens da curva granulométrica 4

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 8/12,5	Pó Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	25,0	32,0	38,0	5,0

As estabilidades começaram finalmente a subir, de forma evidente. Porém, as porosidades continuavam muito aquém do que seria suposto, muito baixas, logo nos provetes de 4%. Com o intuito de resolver esta questão optou-se, primeiramente, por aumentar a massa dos provetes, de modo a dificultar a compactação, o que se verificou infrutífero e então, abrir a curva granulométrica, testando as percentagens do Quadro G 5. A mudança para estas percentagens não foi aleatória, foram produzidos manualmente e ensaiados vários provetes testes.

Quadro G 5 – Percentagens da curva granulométrica 5

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 8/12,5	Pó Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	31,0	32,0	34,0	5,0

Em consequência desta alteração íngreme da abertura da curva granulométrica verificou-se novamente a redução das estabilidades, contudo estabeleceu-se finalmente um ponto fundamental da formulação. O método do provete saturado com superfície seca (método B - EN 12697-6) não permite determinar correctamente a baridades deste tipo de material, possivelmente porque ao ser um material de superfície consideravelmente rugosa, os seus poros enchiam-se de água e esse peso era continuamente considerado no peso submerso do provete. Esta conclusão adveio do facto de ao se abrir consecutivamente a curva, as baridades obtidas, em vez de irem também diminuindo sucessivamente, na verdade iam aumentando. Assim, definiu-se o método selado (método C – EN 12697) como a metodologia indicada, embora mais trabalhosa, tal como a própria norma refere.

Estabelecida a nova metodologia, tentou-se novamente obter os resultados com as granulometrias da curva granulométrica 5 por ser a com melhores resultados até à data e verificaram-se excelente estabilidades e porosidades um pouco abaixo do esperado. Com base nisto definiu-se aquela que foi a curva final da formulação, intermédia às duas anteriores (Quadro G 6).

Quadro G 6 – Percentagens da curva granulométrica 6

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 8/12,5	Pó Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	27,0	32,0	36,0	5,0

ANEXO H – FUSO GRANULOMÉTRICO E CURVA DA MISTURA BETUMINOSA FINAL

Quadro H 1 - Percentagens de material passado nos peneiros correspondentes à curva da mistura betuminosa e ao fuso granulométrico estabelecido

Peneiros	Fuso		Curva da mistura
Série Base + Série 2 (mm)	Limite Inferior	Limite Superior	(%) material passado
63,00	100	100	100,00
40,000	100	100	100,00
31,500	100	100	100,00
20,000	100	100	100,00
14,000	90	100	92,75
10,000	62	78	68,48
4,000	30	44	35,84
2,000	22	30	24,48
0,500	12	21	13,21
0,125	7	13	9,24
0,063	4	9	7,21

ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIO DE COMPACTABILIDADE

Quadro I 1 – Valores das baridades e porosidade consoante a energia de compactação aplicada

Mistura	N.º Pancadas	Baridade dos provetes compactados obtida no ensaio (kg/m3)	Baridade em função da energia de compactação aplicada (kg/m3)	Porosidade (%)
MB 170/160	5	2182	2182	17,0
	15	2291	2285	12,9
	25	2340	2359	11,0
	35	2433	2410	7,4
	50	2430	2461	7,6
	100	2525	2524	3,9
MB 193/180	5	2217	2221	15,7
	15	2344	2333	10,8
	25	2395	2404	8,9
	35	2463	2450	6,3
	50	2487	2490	5,4
	100	2545	2527	3,2
MB 180/162	5	2042	2021	22,1
	15	2091	2107	20,2
	25	2168	2177	17,3
	35	2231	2235	14,9
	50	2348	2302	10,4
	100	2398	2422	8,5

ANEXO J – RESULTADOS DO ENSAIO DE PISTA

Quadro J 1 – Resultados do ensaio de pista para a MB 170/160

Ciclo de Carga	RDAR (mm 1E4 ciclos de carga)		Valor médio
	Laje1	Laje 2	
0	0,08	0,06	0,07
250	0,85	0,89	0,87
500	1,10	1,13	1,12
750	1,27	1,32	1,30
1000	1,46	1,48	1,47
1250	1,59	1,62	1,61
1500	1,74	1,74	1,74
1750	1,88	1,84	1,86
2000	2,02	1,96	1,99
2250	2,15	2,08	2,12
2500	2,27	2,19	2,23
2750	2,37	2,33	2,35
3000	2,49	2,44	2,47
3250	2,59	2,56	2,58
3500	2,70	2,70	2,70
3750	2,83	2,81	2,82
4000	2,87	2,92	2,90
4250	2,96	3,04	3,00
4500	3,04	3,27	3,16
4750	3,13	3,44	3,29
5000	3,20	3,58	3,39
5250	3,27	3,58	3,43
5500	3,34	3,73	3,54
5750	3,45	3,85	3,65
6000	3,48	3,95	3,72
6250	3,52	4,04	3,78
6500	3,57	4,13	3,85
6750	3,63	4,25	3,94
7000	3,66	4,33	4,00
7250	3,71	4,42	4,07
7500	3,77	4,49	4,13
7750	3,80	4,53	4,17
8000	3,85	4,61	4,23
8250	3,90	4,69	4,30
8500	3,92	4,78	4,35
8750	3,97	4,83	4,40
9000	4,00	4,92	4,46
9250	4,05	4,98	4,52
9500	4,07	5,05	4,56
9750	4,11	5,12	4,62
10000	4,17	5,21	4,69

Quadro J 2 – Resultados do ensaio de pista para a MB 193/180

Ciclo de Carga	RDAR (mm 1E4 ciclos de carga)		Valor médio
	Laje 1	Laje 2	
0	0,00	0,00	0,00
250	1,15	1,04	1,10
500	1,62	1,28	1,45
750	1,87	1,42	1,65
1000	2,15	1,57	1,86
1250	2,44	1,68	2,06
1500	2,60	1,78	2,19
1750	2,82	1,89	2,36
2000	2,94	1,97	2,46
2250	3,15	2,08	2,62
2500	3,17	2,13	2,65
2750	3,39	2,21	2,80
3000	3,41	2,27	2,84
3250	3,59	2,33	2,96
3500	3,62	2,44	3,03
3750	3,82	2,51	3,17
4000	3,88	2,57	3,23
4250	3,96	2,62	3,29
4500	4,15	2,62	3,39
4750	4,11	2,67	3,39
5000	4,36	2,72	3,54
5250	4,33	2,76	3,55
5500	4,31	2,82	3,57
5750	4,48	2,94	3,71
6000	4,56	2,93	3,75
6250	4,59	3,1	3,85
6500	4,62	2,99	3,81
6750	4,75	3,08	3,92
7000	4,8	3,06	3,93
7250	4,85	3,12	3,99
7500	4,95	3,15	4,05
7750	4,91	3,24	4,08
8000	5,11	3,27	4,19
8250	5,16	3,3	4,23
8500	5,08	3,31	4,20
8750	5,17	3,28	4,23
9000	5,26	3,17	4,22
9250	5,45	3,28	4,37
9500	5,49	3,24	4,37
9750	5,4	3,21	4,31
10000	5,54	3,23	4,39

Quadro J 3 – Resultados do ensaio de pista para a MB 180/162

Ciclo de Carga	RDAR (mm 1E4 ciclos de carga)		Valor médio
	Laje 1	Laje 2	
0	0,04	0,06	0,05
250	1,06	1,54	1,30
500	1,34	2,03	1,69
750	1,46	2,55	2,01
1000	1,65	2,77	2,21
1250	1,77	2,94	2,36
1500	1,88	3,04	2,46
1750	1,99	3,25	2,62
2000	2,09	3,28	2,69
2250	2,20	3,45	2,83
2500	2,27	3,65	2,96
2750	2,34	3,62	2,98
3000	2,45	3,73	3,09
3250	2,49	3,92	3,21
3500	2,58	3,89	3,24
3750	2,59	3,94	3,27
4000	2,65	4,17	3,41
4250	2,69	4,14	3,42
4500	2,78	4,18	3,48
4750	2,86	4,45	3,66
5000	2,87	4,41	3,64
5250	2,94	4,56	3,75
5500	3,01	4,51	3,76
5750	3,09	4,74	3,92
6000	3,21	4,56	3,89
6250	3,17	4,62	3,90
6500	3,20	4,66	3,93
6750	3,28	4,83	4,06
7000	3,29	4,92	4,11
7250	3,36	5,05	4,21
7500	3,40	5,11	4,26
7750	3,41	5,11	4,26
8000	3,57	5,02	4,30
8250	3,62	5,24	4,43
8500	3,56	5,16	4,36
8750	3,64	5,33	4,49
9000	3,68	5,35	4,52
9250	3,73	5,25	4,49
9500	3,71	5,18	4,45
9750	3,91	5,20	4,56
10000	3,80	5,55	4,68

ANEXO K – RESULTADO DO ENSAIO DO MODULO DE RIGIDEZ

Mistura	Frequência (Hz)	Módulo de Rigidez (MPa)	Ângulo de Fase (graus)
MB 170/160	0,1	1621,2	46,31
	0,2	1991,3	37,84
	1	4285,5	44,96
	5	7978,4	34,10
	10	9408,7	27,18
	20	11796,3	19,66
	50	3121,0	31,91
MB 193/180	0,1	1490,3	43,03
	0,2	1475,1	29,93
	1	3453,2	41,91
	5	6771,1	29,61
	10	8243,6	23,18
	20	10022,8	15,25
	50	2176,1	32,48
MB 180/162	0,1	1091,6	46,28
	0,2	1270,2	45,10
	1	3145,6	45,58
	5	6687,4	36,48
	10	7971,6	29,09
	20	9246,2	19,67
	50	2863,6	38,07

Quadro K 1 – Resultados do ensaio do modulo de rigidez para as misturas em estudo

ANEXO L – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Mistura	Provete	Extensão (E-6)	Vida à Fadiga (Ciclos)
MB 170/160	19	350	9955
	20	275	35808
	21	200	225309
	22	275	33169
	23	350	11258
	24	200	271708
	25	275	39520
	26	200	200862
	27	350	12620
MB 193/180	2	350	30172
	3	200	2064770
	4	275	142506
	6	350	26082
	7	275	146948
	8	200	1081739
	12	200	1389391
	13	275	232417
	14	350	22020
	16	275	232383
MB 180/162	1	275	99142
	3	350	28576
	4	200	1084498
	5	350	36579
	7	350	37576
	8	275	214418
	9	200	546505
	11	275	161707
	12	350	31468
	13	200	1404417
	14	275	177953
	15	275	153883
	16	350	64045
	17	200	822241
	18	200	759404

Quadro L 1 – Resultados do ensaio à fadiga para as misturas betuminosas em estudoⁱ

ⁱ Linhas a sombreado indicam as vigas ensaiadas no laboratório NIDIn, as restantes ensaiaram-se no laboratório do IST.